MONIQUE DACHARRY

PRECIPITATIONS ET ECOULEMENT DANS LE BASSIN SUPERIEUR DE LA LOIRE EN AMONT DE GIEN

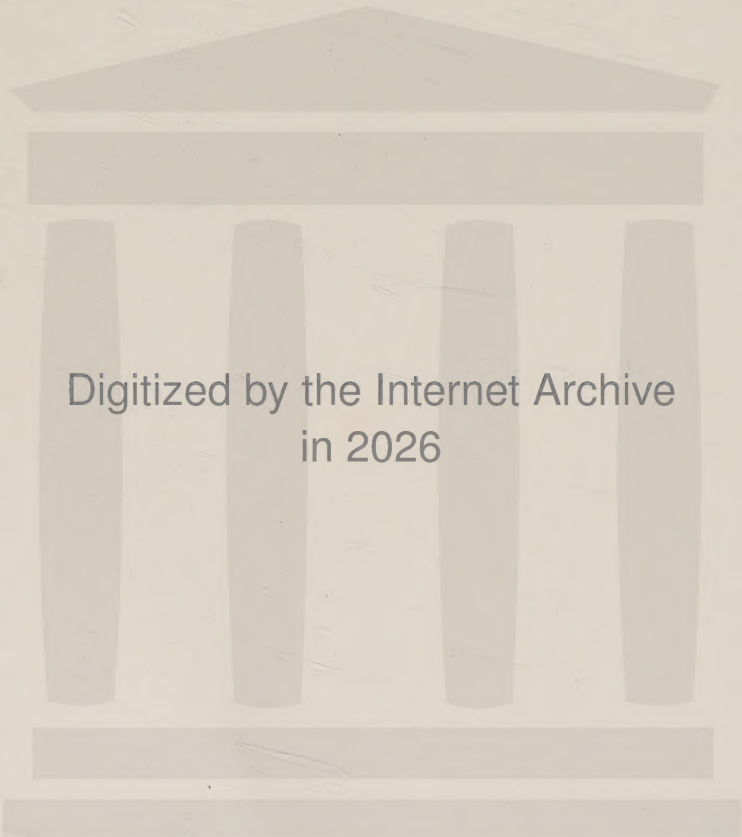
TOME I

THESE PRESENTEE DEVANT L'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE (BREST)
– LE 6 AVRIL 1973 –

SERVICE DE REPRODUCTION DES THESES
UNIVERSITE DE LILLE III
- 1975 -

COMPOSITION DU JURY

M.P. BIROT, *Président*,
M. A. GUILCHER, *Rapporteur*,
M.M. PARDE.
M.J. RODIER.
M.L. TURC.


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545813_0005

MONIQUE DACHARRY

PRECIPITATIONS ET ECOULEMENT DANS LE BASSIN SUPERIEUR DE LA LOIRE EN AMONT DE GIEN

TOME I

THESE PRESENTEE DEVANT L'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE (BREST)
– LE 6 AVRIL 1973 –

SERVICE DE REPRODUCTION DES THESES
UNIVERSITE DE LILLE III
- 1975 -

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

TABLE DES MATIÈRES

page

INTRODUCTION 13

PREMIERE PARTIE : LES DONNEES DE BASE SUR LE BASSIN DE LA LOIRE EN AMONT DE GIEN . . . 29

Chapitre I. **Inventaire des données pluviométriques et hydrométriques** 31

I. L'information pluviométrique 32

II. Nature, richesse et limites de la documentation hydrométrique 37

A. Dualité de l'information hydrologique 37

1. *Hauteurs d'eau* 38

2. *Débits* 40

B. Des rivières naturelles, chance du chercheur 43

C. De grosses lacunes dans l'information hydrométrique . . 46

Chapitre II. **La brièveté des séries d'observation et le problème de leur valeur représentative** 51

I. La variabilité interannuelle des pluies et des modules — Ajustement aux fréquences observées 52

II. Valeur représentative des années récentes 58

A. Remarques générales 58

B. Les modules 59

C. Les variations saisonnières 61

D. Les situations extrêmes 62

Chapitre III. **Quelques jalons dans l'ensemble ligérien : les bassins élémentaires** 67

I. Evaluation du volume d'eau précipitée sur un bassin versant . 68

II. Les principaux caractères des bassins témoins 72

A. Les divers paramètres 73

B. Récapitulation d'ensemble des principaux traits . . . 78

1. *Les points communs* 78

2. *Les hétérogénéités principales* 80

page

DEUXIEME PARTIE : LA VIE DU FLEUVE, SON REGIME 85

Quelques points de méthode 87

Chapitre I. **Une difficulté de la définition des régimes : la variabilité interannuelle des débits mensuels** 91

I. Variabilité de la date des hautes et basses eaux annuelles . . 92

II. Les écarts des abondances moyennes « particulières » d'un même mois avec la « normale » 96

A. Critères choisis 96
— *Coefficient de variation* 96
— *Rapport des moyennes mensuelles extrêmes* . . . 98
— *Indice K 3* 98

B. Conclusions principales 98

III. La recherche des causes de la variabilité 100

Chapitre II. **Les variations saisonnières dans le bassin de la Loire et le régime du fleuve de sa source à Gien** 105

I. L'expression cartographique des hydrologies saisonnières . . 106

A. Débits 106

B. Pluies 108

II. La définition des régimes saisonniers 110

A. Traits généraux et thèmes majeurs de la définition des régimes 110

B. L'influence de la neige sur les variations saisonnières . 112

C. Les influences méditerranéennes dans les manifestations hydrologiques saisonnières 122

1. *La double évolution des courbes de pluies et de débits* 124

2. *La variabilité interannuelle des débits moyens mensuels* 128

D. Les variations saisonnières à Gien 131

Chapitre III. **Basses eaux et étiages** 135

I. Caractères des très basses eaux 136

A. La profondeur des étiages 136

B. Date des étiages les plus fréquents et les plus faibles . . 141

page

C. Description des étiages récents les plus sévères . . . 143
1. *Classement des étiages à Blois et à Gien* . . . 143
2. *Présentation cartographique* 146

II. Genèse et processus des étiages 148
A. La courbe de décrue ou de tarissement 152
1. *Le principe : la loi de tarissement* 152
2. *Les décroissances réelles* 153
B. Place du bassin versant dans le régime des étiages . . 155
1. *Décroissances journalières des cinq premiers jours* 155
2. *Après le premier égouttement du bassin* . . . 155
3. *Variation du coefficient α suivant les débits initiaux* 157

Résumé et conclusion 160

Chapitre IV. **Averses et crues** 163

I. La part des crues dans le régime de la Loire supérieure . . 165
A. Le régime torrentiel 165
B. La discordance entre le rythme des grandes crues et le régime moyen global 169
C. Le faible concours du bassin versant à l'atténuation d'un régime excessif 173
1. *La capacité d'infiltration dans les hauts bassins de la Loire et de l'Allier* 174
2. *La capacité d'infiltration dans les plaines alluviales* . 181
3. *Conclusion sur le rôle du bassin dans l'atténuation des crues* 185

II. Les causes pluviales des crues 186
A. Le classement des crues 187
1. *La typologie « classique » explicative* 187
2. *La typologie « descriptive »* 189
B. Les grands types d'évolution des crues et les circonstances météorologiques dans lesquelles elles se produisent . . 192
1. *Le problème de la correspondance entre types de crues et types de situations météorologiques* . . 193
2. *Le problème du gonflement des crues d'amont en aval* 198
3. *Le problème de la fréquence des grandes crues de printemps et d'automne* 209

Conclusion 212

page

TROISIEME PARTIE : L'ABONDANCE 215

Chapitre I. **De l'opportunité d'une année hydrologique dans le bassin de la Loire** 219

I. Sens de l'expression « année hydrologique » 219

II. Rappel des différentes hypothèses sur le choix de l'année hydrologique 222

III. Application au bassin de la Loire 225

A. Méthode 225

B. Résultats 226

IV. Interprétation des résultats et conclusions 228

A. La neige 228

B. La réserve souterraine 229

C. L'évaporation 230

D. La pluie 231

Chapitre II. **Précipitations et débits annuels : les bilans d'écoulement dans les bassins témoins** 235

I. Corrélations pluvio-fluviales annuelles 235

A. Construction des droites de régression 235

B. Degré de corrélation dans le bassin de la Loire . . . 238

1. *Le coefficient* λ 238

2. *Le coefficient de corrélation* R 240

II. Déficits et coefficients d'écoulement 243

A. Bilans particuliers 244

1. *Variabilité des déficits particuliers* 244

2. *Causes du phénomène de la variabilité dans le bassin de la Loire* 250

B. Bilans globaux 255

1. *Quelques valeurs repères* 255

2. *Influences sur les déficits annuels globaux des précipitations moyennes et des températures* . . . 256

3. *Référence aux évaluations de Wundt* 258

4. *Formules de L. Turc pour l'évaluation du déficit* . 259

page

Chapitre III. **Les ressources hydriques naturelles en amont de Gien** 265

I. La question des pertes souterraines d'une partie des eaux de la Loire 266

A. Part de la géologie dans les anomalies de l'écoulement du Chapeauroux 266

B. Particularités hydrogéologiques du bassin de la Loire entre le Bec d'Allier et Gien 267

1. *Des faits insolites* 267

2. *Les conditions géologiques de l'écoulement* . . . 271

3. *Les prélèvements de l'évapotranspiration* . . . 275

II. Résumé du bilan 279

A. L'abondance moyenne des rivières dans le bassin supérieur de la Loire 279

B. L'abondance moyenne à Gien 284

CONCLUSION 289

BIBLIOGRAPHIE 297

TABLE DES FIGURES 321

TABLE DES TABLEAUX 329

Pour la commodité de la lecture, les figures, la plupart des tableaux et les fiches des vingt et un bassins témoins auxquels il est fait référence dans le texte ont été groupés dans le second tome. Pour trouver leur place, il suffit de consulter les tables des figures et tableaux à la fin du premier volume et en tête du second.

INTRODUCTION

L'étude hydrologique d'un fleuve consiste, dans un sens très large, à suivre l'eau météorique à partir du moment où elle atteint le sol jusqu'à l'exutoire du bassin qu'elle vivifie, en passant par les innombrables voies où elle circule en perpétuel mouvement et renouvellement. C'est une synthèse où ne manque aucune branche de la géographie physique, où intervient aussi la géographie humaine puisque les phénomènes physiques d'évaporation, d'infiltration, de ruissellement, d'écoulement souterrain, de rétention, de mise en réserve, et toutes les actions humaines de captage, de consommation, d'utilisation, de restitution, concourent à donner aux rivières l'aspect que nous leur connaissons. Le déficit d'écoulement, qui est la différence entre la quantité d'eau tombée sur le bassin et le débit du fleuve à sa sortie, mesure globalement toutes les causes de l'écoulement autres que la première et la principale, les précipitations. L'examen des deux termes, initial et final, précipitations et débit, enserre donc la réalité hydrologique globale et complexe. Dans cette étude, telle qu'elle est conçue, il n'est pas question de négliger les phénomènes intermédiaires, il n'est pas question non plus d'en faire l'analyse isolée mais de les présenter à leur place dans l'ensemble qu'ils contribuent à caractériser, en l'espèce le haut bassin de la Loire.

Le choix d'un vaste domaine fluvial de 35.890 km², pourtant le tiers seulement de tout le bassin ligérien, peut paraître à la fois ambitieux et restrictif. Il appelle quelques explications préalables sur le but visé dans les limites assignées à cette étude.

Le bassin étudié est vaste, en effet, par rapport aux surfaces beaucoup plus exigües qui sont habituellement choisies par l'analyse hydrologique comme cadre de recherche sur les conditions physiques de l'écoulement. Les « bassins versants d'investigation » (1) ont des superficies de quelques dizaines de kilomètres carrés au plus et mobilisent des équipes de cher-

(1) R. HLAVEK (1968) a bien expliqué pourquoi le terme de « bassin d'investigation ou d'analyse » est, dans la plupart des cas, mieux que ceux de « bassin expérimental » ou « bassin représentatif » approprié à des bassins sur lesquels l'homme ne modifie pas en les contrôlant les facteurs conditionnels de l'écoulement — ou à des bassins qui ne peuvent, à cause de leur petite taille et de leur homogénéité, représenter valablement les combinaisons complexes de facteurs extrêmement variables dans l'espace.

cf. aussi M. PARDE (1965).

cheurs spécialisés, ingénieurs hydrauliciens, hydro-géologues, morphologues, pédologues, agronomes, chimistes, micro-climatologues... Combien de travaux détaillés n'ont-ils pas suivi l'équipement, en 1950, du bassin d'Alrance (3 km² 15) par la Division Hydrologique du Centre de Recherches et d'Essais de l'Electricité de France (²) ou celui du bassin versant d'investigation hydrologique de l'Orgeval (104 km²), affluent du Grand Morin, par le Génie Rural à partir de 1960 (³). De même, le bassin de la Savoureuse dans les Vosges méridionales, d'une dizaine de kilomètres carrés de surface, celui du Gapeau en Provence cristalline, celui du Blavet en Bretagne, se sont révélés des cadres naturels propices à l'analyse scientifique de l'écoulement fluvial.

L'échelle choisie pour la présente étude de la Loire, sans commune mesure avec celle des petits bassins d'investigation, confirme les intentions qui ont présidé à ce travail et laisse prévoir la méthode utilisée.

Le fleuve dont il s'agit de dresser le bilan global est caractérisé à la fois par un débit spécifique relativement médiocre et un régime irrégulier. Ces deux traits sont mis en relief par la comparaison des valeurs du module et du rapport des moyennes mensuelles extrêmes, sur une période de quarante ans, respectivement dans le cas du Rhin à son entrée en France, du Rhône entre les confluences de la Drôme et de l'Ardèche, de la Loire à Gien et en amont de Nantes, de la Garonne en aval du Lot, de la Seine à Paris et de la Moselle à Cochem.

Médiocrité et immodération apparaissent bien comme les résultantes des

Stations	*Périodes*	*Superficie du bassin versant (en km²)*	*Débit moyen annuel*		*Rapport des moyennes mensuelles extrêmes*
			brut (m³/s)	*spécif. (l/s/km²)*	
Rhin à Rheinfelden	1920-1960	34.550	1019	29,5	2,07
Rhône au Teil	1920-1960	69.500	1501	21,6	1,42
Seine à Paris	1927-1965	44.300	268	6,05	5,75
Loire à Montjean	1920-1960	110.000	871	7,9	6,45
Loire à Gien	1920-1960	35.890	345	9,6	6,6
Garonne au Mas d'Agenais	1920-1960	52.000	590	11,35	5,35
Moselle à Cochem	1891-1930	28.230	308	10,9	4,4

(²) Ce bassin d'un sous-affluent du Tarn est situé sur le plateau du Segala à proximité du village d'Alrance (Aveyron). Une abondante information expérimentale contrôlée a permis de nombreuses études sur les précipitations, l'évaporation et les conditions de l'écoulement en vue du calcul et de la prévision des débits.

cf. principalement : P. CAPPUS (1953 - 1954 - 1957 - 1960), H. DOSSEUR (1964), J. JACQUET (1960).

(³) cf. M. CHARTIER (1966, a et b), C.M. COSANDEY (1970), F. MORAND (1966).

caractères particuliers différents ou semblables des affluents successifs dont les eaux mêlées font un grand fleuve à Gien.

L'intention de cette étude n'est donc pas d'additionner les monographies relatives aux tributaires de la Loire mais de retenir les facteurs hydrologiques des affluents dans la mesure seulement où ils expliquent les comportements moyens et exceptionnels du fleuve.

A cause des incertitudes, des disparités et des lacunes de la double documentation hydrologique et climatique, l'estimation quantitative des eaux de la Loire imposait d'étendre le champ d'investigation à un espace suffisant pour que l'observation directe et les comparaisons entre petits bassins élémentaires d'une centaine à quelques milliers de kilomètres carrés acquièrent tout leur sens.

De plus, l'étude dynamique des irrégularités du fleuve avait d'autant plus d'intérêt qu'elle regroupait un plus grand nombre de flots élémentaires isssus de « provinces » climatiques différentes. Il est sans doute légitime — à cause des conséquences qu'elles peuvent avoir localement — d'étudier isolément les crues peu extensives des rivières du Velay, du Cantal ou du Morvan, par exemple, et de rechercher quels types de temps les font naître. Mais il n'en reste pas moins que les mêmes crues ne sont guère sensibles dans le flot de Loire entre Nevers et Gien. Les événements exceptionnels, crues ou pénuries catastrophiques dans la partie moyenne du grand fleuve, sont, au contraire, le résultat de concordances qui ont leur origine dans des phénomènes météorologiques de grande envergure, dépassant de beaucoup le cadre d'un bassin hydrologique même s'il a 35.000 km². Le champ d'observation doit donc être assez vaste pour permettre d'étudier la genèse des averses généralisées ou des sécheresses prolongées et saisir le mécanisme des crues ou des pénuries qui en résultent.

A l'époque où l'idée du présent travail prenait corps, d'autres raisons, plus pratiques, induisaient les responsables en général de la politique française touchant à l'aménagement de l'espace, et les communautés ligériennes en particulier, à poser les problèmes de l'eau dans le vaste cadre des bassins versants. Le IVème Plan publié en 1962 fut le premier à y consacrer un chapitre. Le 16 avril 1964, une Commission de l'Eau pour le Vème Plan était créée. La même année, était promulguée la loi du 16 décembre 1964, relative au régime, à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution. Le découpage de la France en six régions, improprement appelées « bassins », « Artois-Picardie », « Rhin », « Seine-Normandie », « Loire-Bretagne », « Adour-Garonne » et « Rhône-Méditerranée-Corse », vint ajouter un nouveau principe de division territoriale à ceux qui existaient déjà (4).

(4) Conformément à la loi du 16 décembre 1964, une mission technique fut créée dans chaque bassin par le décret d'application n° 65-889 du 21 octobre 1965 relatif

Ainsi, quand l'utilisation et le partage des eaux fluviales devenues rares ont dû être organisés, la région hydrologique s'est imposée comme unité administrative. C'est dire qu'au-dessus d'autres divisions régionales à fondement économique, le fleuve crée entre tous ses riverains une manière de solidarité : l'usage de l'eau ou l'aménagement de son cours en un point quelconque a, de fait, des répercussions sur les destinées économiques des autres parties du bassin. Plutôt que solidarité, il faudrait dire interdépendance car les besoins des riverains sont loin d'être toujours complémentaires : ils appellent des arbitrages et la sauvegarde d'un bien commun à tous les intéressés d'amont en aval (5). Comme l'étude des ressources en eau d'un fleuve est liée à celle de ses usages, il est nécessaire de prendre une vue d'ensemble de l'eau circulant dans l'organisme fluvial tout entier et non seulement dans les limites bornées de chaque parcelle du bassin. C'est une synthèse de cette sorte que s'est proposée, pour le bassin de la Loire, l'Association Nationale pour l'Etude de la Communauté de la Loire et de ses Affluents (A.N.E.C.L.A.), organe d'expression et d'intervention des usagers de la Loire et de ses affluents (départements, communes, Chambres de commerce et d'agriculture, industriels, particuliers...), fondée en 1957 pour établir un programme d'aménagement du bassin, qui permettrait d'utiliser de la façon la

---

à la coordination interministérielle dans le domaine de l'eau. Composée d'ingénieurs et de spécialistes nommés par le Délégué de l'Aménagement du Territoire sur proposition des ministres intéressés, elle rassemble les éléments devant permettre l'établissement de plans d'aménagement de bassins.

Puis, chaque bassin fut doté d'une « Agence financière » et d'un « Comité de bassin ». L'Agence financière est un établissement public. Elle doit faciliter les diverses actions d'intérêt commun du bassin, procéder à des études, attribuer des subventions et des prêts, percevoir des redevances. Pour le bassin Loire-Bretagne, son siège est à Orléans.

Au Comité de bassin, siègent, à parts égales, les représentants des collectivités locales, des usagers et de l'Etat, qui donnent leur avis sur les programmes de travaux et délibèrent sur le taux et l'assiette des redevances perçues par l'Agence.

Sur l'esprit et le fonctionnement de ces structures, *cf.*, en plus des textes législatifs (J.O. du 23 septembre 1966 — Décret n° 66-699 du 14 septembre 1966, « Création et fonctionnement des Comités de Bassin » ; — Décret n° 66-700 du 14 septembre 1966, « Caractère et objet des Agences Financières ») :

— I. CHERET (1967),

— Le problème de l'eau en France. Notes et Etudes Documentaires, n° 3219, 1965,

— Rapport général pour le Vème Plan. Commission de l'Eau. Documentation Française, 1966,

— Le Moniteur des Travaux Publics. N° spécial, janvier 1968.

(5) Du point de vue économique, le fleuve peut être un facteur d'unité des régions qu'il traverse. Il l'est souvent mais il ne l'est pas toujours et, à l'échelle d'un fleuve entier, il l'est même rarement. Même dans le cas d'un fleuve aussi économiquement dominateur que le Rhin, la structuration régionale n'est pas strictement liée au bassin fluvial.

cf. J. LABASSE (1966).

plus judicieuse les ressources hydriques naturelles ([6]). A cette fin, l'A.N.E.C.L.A. suscita, en 1963, la Société d'Economie Mixte pour la Communauté de la Loire et de ses affluents (S.E.M.E.C.L.A.) qui, la même année, proposait aux pouvoirs publics un programme d'études pour la réalisation en première urgence d'une tranche d'aménagement du bassin de la Loire.

*
* *

Ces dernières considérations vont à l'encontre de l'option qui limite l'étude de la Loire à la partie du bassin comprise entre sa source et Gien. Cependant, la coupure de Gien a paru, pour plusieurs raisons, la plus satisfaisante.

Dès 1857, un ingénieur du Service de la Loire distinguait assez maladroitement les deux grandes parties du bassin : « Du Bec d'Allier à la mer, la Loire est un grand canal ne produisant point ou presque point d'eau par lui-même et servant seulement de réceptacle aux eaux des grands affluents » ([7]). En 1902, VIDAL de LA BLACHE exprimait plus concisément une autre réalité du fleuve entrant « comme un personnage étranger dans le Bassin Parisien », caractère qu'il perd progressivement jusqu'à la confluence du Cher ([8]).

Il n'est pas douteux qu'à sa sortie du Massif Central, la Loire a des caractères hydrologiques affirmés et distincts. A 93 km en aval du Bec d'Allier, le fleuve est encore sous la dépendance dominante de la Loire supérieure et de l'Allier. Après la confluence des deux grands tributaires, l'Aubois, la Vauvise, le Mazon, la Nohain, la Vrille draînent des surfaces réduites (3.175 km²), peu arrosées et ne déversent plus dans le fleuve que de faibles volumes d'eau. S'il en est à peu près de même jusqu'au Bec du Cher, 200 km plus loin, des pertes amoindrissent considérablement et sur une certaine distance le débit après Gien.

Au sein du grand bassin, la région étudiée constitue donc un ensemble bien particularisé. Son influence n'en est pas moins forte, hydrologiquement, sur le cours postérieur du fleuve jusqu'à son embouchure. Avec 40 % des eaux de la Loire, le haut bassin, représentant 30 % de la superficie totale, est de beaucoup le plus producteur d'eau.

La relative abondance qui caractérise cette province hydrologique a

---

([6]) Ce groupement avait eu des précédents : la Compagnie des « Marchands fréquentant la rivière de Loire ».

cf. M. MANTELLIER (1867-1869) et R. DION (1961).

Au début du XXème siècle, la Société « La Loire navigable » réussit à grouper seize comités de riverains. cf. L. MONNIER (sans date, en fait 1963 ou 1964).

([7]) cf. Rapport anonyme présenté à M. le Ministre sur la situation des études au mois de mai 1857. Exposé des vues générales qui ont présidé aux études. Archives d'Orléans, dossier 30887.

([8]) VIDAL DE LA BLACHE. Tableau de la géographie de la France. Paris, 1902, pp. 159-160.

d'ailleurs suffi pour que, à ses deux extrémités, ses eaux aient été convoitées par les bassins voisins. Les aménagements de Montpezat depuis 1956 détournent vers le Rhône une partie des eaux de la haute Loire. Et c'est de l'amont de Gien que devaient partir les conduites de captage vers Paris, suivant un projet médité pendant plus d'un siècle (9).

Une seconde raison de limiter l'étude à cette partie du bassin tient à sa nature strictement hydrologique au sens où l'entend le professeur M. PARDE, c'est-à-dire qu'elle se bornera à l'examen et à l'explication des débits et de leurs variations sans considération, sinon subsidiaire, des aspects de dynamique et de morphologie fluviales (10).

---

(9) Le premier projet de prélèvement des eaux de la Loire pour les besoins de la région parisienne fut présenté en 1859 au Conseil Général du Loiret qui le rejeta « par le motif qu'une dérivation qui n'était pourtant que de 500.000 m³ diminuerait le volume du fleuve et causerait un préjudice considérable au commerce et à la navigation ... ».

Les projets suivants se heurtèrent à la même opposition. Les grandes lignes du projet SELLIER sont résumées ainsi dans le procès-verbal du Conseil Général du Loiret, session de 1868 : « Monsieur Sellier, représentant d'une compagnie en voie de formation, a fait avec la Ville de Paris, un traité par lequel il s'engage, s'il obtient une concession d'eau à prendre dans le lit de la Loire, vers Cosne, à amener chaque jour dans la capitale, par un canal de 250 km environ, une quantité d'eau de 500.000 m³. A ce projet principal, la Compagnie Sellier a ajouté l'idée de prendre sur le tronc du canal une quantité de 260.000 m³ qu'elle distribuerait, par une canalisation souterraine et à l'aide de moyens divers, à 550 communes de la Beauce et du Gâtinais représentant en territoire une étendue de 726.000 hectares. Pour faire face à cette distribution de 800.000 à 900.000 m³ d'eau par jour, la Compagnie Sellier demande au gouvernement la concession d'une prise d'eau en Loire de 10 m³ par seconde dont six attribués à la consommation parisienne et trois à celle de la Beauce et du Gâtinais, le surplus devant être compté pour les pertes naturelles résultant de l'absorption et de l'évaporation ».

En 1900, le projet élaboré par BECHMANN, ingénieur en chef du Service des Eaux de la Ville de Paris, aurait prélevé, par un aqueduc, 430.000 m³ par jour, soit 5 m³/s.

En 1901, le Dr. PROMPT, dans son projet publié par la Gazette Médicale du Centre, se proposait d'utiliser le lac d'Issarlès dans lequel on prendrait 27 millions de m³ pour Paris ... .

Dans l'histoire tumultueuse de tous les projets de captage, le dernier épisode prit naissance avec le décret du 11 septembre 1931 déclarant les travaux d'utilité publique, dont la validité fut prorogée de cinq ans en cinq ans jusqu'à son annulation par le Conseil d'Etat, le 6 juin 1958. Derechef adopté par ordonnance n° 59-170 du 7 janvier 1959, le projet semble définitivement abandonné par la Ville de Paris depuis la construction des grands barrages réservoirs en amont de Paris.

cf. Fonds P. GUILLON, Bibliothèque Municipale d'Orléans et Archives des Ponts et Chaussées (services régionaux), Archives du Loiret.

(10) « La potamologie est la science des fleuves et des rivières. Notre terminologie distingue en elle deux branches d'ailleurs très interférentes : l'hydrologie fluviale et la dynamique fluviale. La première étudie les régimes des eaux courantes, c'est-à-dire les débits fluviaux, leurs variations et les causes de ces phénomènes. La dynamique fluviale a pour objets les courants fluviaux, leurs forces d'érosion, les transports solides qu'ils effectuent puis les formes et les altérations naturelles des lits. » (M. PARDE, 1933).

De fait, la province hydrologique définie ne correspond pas à une unité du cadre physique. L'ensemble du bassin laisse, au contraire, une grande impression d'hétérogénéité : du Morvan à la Margeride, des bassins du Velay aux plaines bourbonnaises, les formes du relief, les terrains, la physionomie du milieu végétal, les paysages agricoles sont variés. Une étude du bassin impliquerait de décrire le cadre naturel : relief, climat et végétation. Cela a déjà été fait, magistralement, et le présent travail doit beaucoup à ceux qui se sont appliqués avec rigueur à décrire, dans un cadre régional, l'origine et l'évolution du réseau hydrographique (11), le climat du Massif Central (12), le comportement des eaux (13).

Le lit fluvial ne sera pas non plus étudié ici. En raison de la position de Gien dans le Val de Loire qui commence aux plaines inférieures du Bourbonnais, une étude de dynamique fluviale ne pourrait qu'illégitimement diviser ce qui relève d'un unique domaine de recherche déjà découvert par Y. BABONAUX (1970) et J. GRAS (1963). Ce dernier a bien montré que l'étude morphologique des terrasses, par exemple, requiert la considération des bassins hydrologiques entiers.

Le choix même de Gien comme borne du haut bassin de la Loire se recommande par une raison pratique. Il y a là une station pour laquelle les débits sont connus. Et elle correspond, à neuf kilomètres près, à la limite des 2ème et 3ème sections du vieux Service Hydrologique de la Loire (14). Cet ancien poste hydrométrique de Gien est une « station fondamentale » c'est-à-dire, suivant la typologie de la Société Hydrotechnique de France, un « nœud du réseau hydrologique français » avec, pour le cours de la Loire, Bas-en-Basset à l'amont et Montjean à l'aval. Ces stations font l'objet d'études particulières et de publications des débits moyens journaliers dans l'Annuaire Hydrologique de la France. Grâce aux recherches de la 4ème Circonscription Electrique, aujourd'hui Circonscription Electrique Centre et Ouest, aidée par l'Administration des Ponts et Chaussées d'Orléans (Service Hydrologique Centralisateur et Service d'Annonce des Crues), les séries remarquables de lectures à l'échelle de Gien depuis 1861 ont pu être rassemblées ainsi que les résultats des jaugeages effectués en ce lieu dès l'année 1857 (PELLECUER et BARRIERE, 1963) : les valeurs en ont été confrontées

(11) E. BAULIG (1928), J. BEAUJEU-GARNIER (1950), M. DERRUAU (1949), R. DION (1934), L. GACHON (1939), J. GRAS (1963).

(12) R. BALSEINTE (1966), P. ESTIENNE (1956).

(13) A. FEL (1962), L. GALLOUEDEC (1910), H. ONDE (1923).

(14) La division de la Loire en sections par l'Administration des Ponts et Chaussées (Service d'Annonce des Crues et de la Navigation) remonte à 1847 et correspond à l'organisation des services de navigation. Elle distingue une première section jusqu'à l'amont de Digoin, une seconde de Digoin à Briare, la troisième de Briare à Ancenis, ville au delà de laquelle l'influence des marées de l'Océan commence à se faire sentir. En aval, la Loire relève de l'Ingénieur en chef de la Loire maritime à Nantes.

à celles de Blois, station sans doute la plus stable du Val de Loire depuis les relevés des hauteurs à l'échelle en 1841, à celles de Tours (lectures depuis 1820) et à celles d'Orléans (depuis 1858). La station de Gien fait ainsi la liaison entre les deux parties du bassin ligérien : celle de l'aval, la plus anciennement étudiée par souci tant d'analyser les débordements pour les combattre que de préserver la valeur économique du fleuve pour les régions traversées ; celle de l'amont, moins connue alors même qu'y sont projetés et entrepris de grands aménagements propres à régulariser les débits.

*
* *

Les quelques ouvrages essentiels évoqués dans les lignes qui précèdent laissent pressentir que les connaissances potamologiques déjà acquises sur la Loire et ses tributaires ne sont pas minces. Le fleuve a même fait l'objet de trois monographies, déjà anciennes, de J. IMBART de la TOUR (1900), de L. GALLOUEDEC (1910) et de A. BABINET et E. MAILLET (1919). Il est loisible d'y ajouter l'étude d'ensemble (1960-1962) d'A. RENAUD, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, ingénieur conseil d'A.N.E.C.L.A., qui rassemble dans un but pratique la documentation préexistante. Le mémoire du professeur PARDE (1964) est un précieux état des questions, qui ouvre les voies à la recherche, un recensement des problèmes et des lacunes outre qu'il met en évidence certains faits essentiels.

L'étude présente vient après une longue série de travaux dont il n'est pas question de faire l'inventaire. Les bibliographies de L. GALLOUEDEC ou de R. DION sont assez connues pour qu'il suffise d'y renvoyer une fois pour toutes. Les travaux qui y sont cités feront seulement, à l'occasion, l'objet de références spéciales et précises. En revanche, doivent être rappelés les travaux antérieurs dont ces auteurs n'ont pas fait mention ou qu'ils ne semblent pas avoir connus (15).

Le simple classement des documents relatifs à la Loire, dans l'ordre chronologique de leur parution, est révélateur. Les titres seuls, en effet, des ouvrages et mémoires en disent déjà long sur les soucis divers qui ont prévalu à telle ou telle époque et font apparaître comme en coupe plusieurs étages de ce qu'on pourrait appeler la sédimentation documentaire ligérienne.

(15) Tel est notamment le cas des manuscrits, correspondances, coupures, articles et plans relatifs à la Loire du très riche fonds Paul GUILLON, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées (Service Spécial de la Loire), légué à la Bibliothèque municipale d'Orléans. Les documents y demeurent non classés à ce jour dans trente-trois liasses que nous avons dépouillées (Ms 1878 à 1907). Il n'en est pas de même des cent trente-deux lots de documents des Ponts et Chaussées d'Orléans versés aux Archives du Loiret en 1969 et dont le travail de classement a été achevé en 1970 (Ms 30845 à 30977) grâce à la diligence de M. CHARNIER, directeur du Service des Archives du Loiret.

La parade millénaire des riverains aux irrégularités des eaux « brusquement abondantes et soudain raréfiées » est décrite dans les deux chefs-d'œuvre de R. DION (1934, 1961). Les plus vieux documents, à commencer par le capitulaire de Louis le Pieux (821), concernent les travaux par lesquels l'homme a d'abord voulu protéger les plaines riveraines contre les inondations puis, à partir de la fin du XVème siècle, améliorer la navigabilité de la Loire en resserrant ses eaux moyennes dans un espace plus étroit. Jusqu'au milieu du XIXème siècle, tous les documents cartographiques, les minutieuses études d'ingénieurs, les chroniques et les textes législatifs ont porté principalement sur l'observation des hauteurs d'eau, la description des inondations, l'étude de leurs effets sur les levées et, réciproquement, de l'effet des levées sur le cheminement des eaux, sur les travaux publics exécutés au bord du fleuve ou dans son lit même.

L'homme cherche à agir sur le conduit fluvial, le lit majeur et le lit mineur, il modifie le chenal, il étudie la mobilité du lit. C'est ainsi qu'en 1710, par exemple, l'Intendant des Turcies et Levées s'avise — à tort ou à raison — que, dans le massif de Neulize, entre la plaine du Forez et celle de Roanne, « les ouvertures considérables dans les rochers pour rendre le passage des bateaux libre et facile » et le nettoyage du « lit de la rivière de tous les rochers et bois qui auraient pu empêcher la navigation » ([16]) ont augmenté le volume et la rapidité des crues de 1707, de juin 1709 et de novembre 1710, et, à partir de juillet 1711, trois digues de pierres furent construites en travers de la vallée, dont celle de Pinay existe encore.

Les appellations successives des services publics spécialisés disent bien les préoccupations dominantes relatives à la Loire : les « turcies et levées » qui protègent des inondations et la « navigation » ([17]). Dès lors, il n'est pas surprenant que les données les plus anciennes portant sur les *hauteurs d'eau* le long du fleuve intéressent presque exclusivement la partie du fleuve la plus menacée, la Loire moyenne, le *Val*.

Il fallut les catastrophes répétées de 1846, 1856 et 1866 pour que

---

([16]) Extraits du rapport de l'Intendant des Turcies et Levées, Robert de la Charte, envoyé sur les lieux.

Cité par R. DION (1961) page 176.

([17]) Création du 2 octobre 1571, sous Charles IX, d'un « surintendant des *Torcies et Levées* ».

En 1665, apparition, sous Colbert, d'un « ingénieur commis par S.M. à la conduite des ouvrages des Turcies et Levées ». Il aura une succession brillante et ininterrompue d'ingénieurs jusqu'à la réforme administrative de 1791 qui supprime le service.

Enfin, encore en 1825, la Direction Générale des Ponts et Chaussées rétablit un organisme spécial à la Loire en créant une « Inspection de la *Navigation* de la Loire depuis le département de la Haute-Loire jusqu'à la mer ».

En 1840, le nouvel organisme reçoit le nom de « Service spécial de la Loire ».

l'attention se portât non plus seulement sur le « contenant » mais sur le « contenu ». Une ère nouvelle de recherches commence avec l'apparition de termes caractéristiques dans les titres des travaux sur la Loire. Les auteurs s'attachent aux *causes* des crues autant qu'à leurs effets. Les premières, semble-t-il, des études de cette nature furent publiées en 1856 et en 1857 ([18]).

C'est à la même époque que commencent la compilation et la *confrontation des données hydrométriques et des observations pluviométriques* aux « udomètres » installés directement par le Service de la Navigation et de l'Annonce des Crues de l'Administration des Ponts et Chaussées ([19]), en plus des appareils relevant des Commissions Météorologiques départementales et du Bureau Central Météorologique ([20]). Dès lors, le champ d'investigation s'étend aux dimensions du *bassin tout entier* et non plus à la seule vallée du fleuve, ainsi qu'en témoigne la « carte au 1/20.000 en hachures du cours de la Loire, depuis l'extrémité supérieure du département de la Loire jusqu'à Saint-Nazaire ». Cette carte fut publiée de 1848 à 1855 ([21]). Enfin, la mesure directe et méthodique des *débits* du fleuve par jaugeage devient un souci constant des grands ingénieurs du XIXème siècle, suivant l'exemple donné par COMOY, COLLIN, GRAEFF, SAINJON, DEGLAUDE etc. ([22]).

([18]) BIMBENET. Note sur la *cause* des inondations de la Loire. Journal du Loiret, Orléans, 39ème année, n° 138, 11 juin 1856.

VALLES. Etudes sur les inondations, leurs *causes* et leurs effets. — Idées théoriques, applications à la Loire. Paris, 1857.

HUNAULT DE LA PELTRIE. Sur quelques unes des *causes* des inondations de la Loire et sur quelques uns des moyens à employer pour les combattre et les prévenir. Angers, 1857.

([19]) cf. décisions ministérielles de 1847 et du 30/7/1853.

([20]) DEGLAUDE. La Loire à Orléans. Régime d'hiver et d'été. Discussions des observations hydrologiques depuis 1830 et *pluviométriques* depuis 1862. Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires t. IX, 1875, 1er sem. pp. 457-480.

— Tableaux graphiques d'*ensemble des hauteurs de pluies et des hauteurs des rivières*. 1862-1893. Archives du Loiret, Fonds des Ponts et Chaussées (Archives Régionales) 30901.

([21]) L'ouvrage suivant est un des premiers à attester cette extension du domaine étudié :

COHENDY. Note sur les accidents géologiques et les inondations qui ont été *le résultat des pluies continuelles de mai 1856 dans le département du Puy-de-Dôme*. Clermont, 1858.

cf., aussi, une lettre du 7 mai 1857 de l'ingénieur en chef COMOY, directeur des Etudes de la Loire, à monsieur COLLIN, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées à Orléans, et tout un dossier sur les *explorations* à faire dans les affluents de la *Loire supérieure*, de l'Allier, du Cher, de l'Indre et de la Vienne. Archives d'Orléans, 30.887.

([22]) GRAEFF. Traité d'hydraulique (1856), tome II, page 192, « Formule pour l'évaluation des débits de la *Loire supérieure* ». Service spécial de la Loire. Instruction sur les procédés de calcul à employer pour les *jaugeages* de la Loire. Orléans, 1860. Un dossier in 4°, Bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées 18001/C 945.

Sous le stimulant des grandes crues, la documentation s'enrichit sans cesse dans la seconde moitié du siècle à tel point d'ailleurs que les études de synthèse deviennent de plus en plus rares. Au fil des années, elles se révèlent aussi moins urgentes à ceux qui n'ont pas été les témoins des grands débordements du fleuve et que trompe la torpeur relative et prolongée, depuis le début du XXème siècle, de la Loire supérieure et moyenne.

Sans abandonner les soucis du passé, les hydrologues contemporains de la Loire ont beaucoup multiplié et diversifié leurs objets d'étude. Les travaux de dynamique fluviale d'Y. BABONAUX (1970) ou ceux des ingénieurs des Ponts et Chaussées, sur la prévision des crues et la protection contre les inondations (P. FUNEL et M. SCHWIRTZ, 1968), sont dans la tradition du XVIIIème siècle alors que les observations et les études des ingénieurs du XIXème siècle se prolongent dans les campagnes de jaugeages sur toutes les artères de la Loire ou encore dans les études des précipitations sur le Massif Central par le Centre Hydrométéorologique de Brive (E.D.F.). En revanche et parallèlement, des thèmes entièrement nouveaux se sont fait jour : irrigation, alimentation en eau potable, hydroélectricité, usages industriels et récréatifs, pollution. Ces récentes extensions de l'hydrologie ligérienne et l'énumération des services administratifs multipliés dont relève la Loire à des titres divers suffisent à montrer la spécialisation des recherches actuelles dans ce bassin. Mais ils laissent soupçonner leur dispersion, leur incoordination, l'étroitesse de leurs champs d'études à mesure que s'affirment les techniques de l'observation et de l'expérience. Aussi, la tâche primordiale de la Mission de Bassin est de rassembler tant d'efforts dispersés ([23]).

Les fins pratiques changeantes et disparates de la documentation existante expliquent ses lacunes. En cas de projets d'aménagement, les observations préalables cessent dès que le projet a été exécuté ou abandonné. Elles sont donc épisodiques comme les projets eux-mêmes. Ainsi, les observations sur les nappes alluviales de la Loire et de l'Allier effectuées le long de treize profils (quatre sur l'Allier — huit sur la Loire à l'amont du Bec d'Allier — et un sur la Loire à l'aval du

([23]) — Circonscription Electrique Centre et Ouest (Limoges et Orléans) dépendant du Ministère de l'Industrie,
— Electricité de France : Centre de Recherches et d'Essais de Chatou,
Division Technique Générale de Grenoble,
Centre hydrométéorologique de Brive,
Laboratoire National d'Hydraulique de Montpellier,
— Directions départementales du Génie Rural et des Eaux et Forêts,
— Station de l'I.N.R.A. de Clermont-Ferrand relevant du Ministère de l'Agriculture,
— Bureau de Recherche Géologique et Minière (Orléans et Clermont-Ferrand),
— Postes et stations de la Météorologie Nationale,
— Mission de Bassin (Orléans).
.....

confluent) pendant cinq années (du 1er janvier 1955 au 15 mars 1960) pour déterminer les conséquences sur la nappe phréatique des prélèvements de Montpezat ont regrettablement cessé quand fut abandonné le projet d'intégrer le haut bassin de l'Allier au domaine de l'alimentation de ladite centrale.

Si l'on reste fidèle à l'image de la sédimentation adoptée pour caractériser les principales étapes de la documentation ligérienne, sa toute récente évolution apparaît comme une véritable discordance : la science du traitement rationnel de l'information sur machine électronique. C'est au niveau de cette discordance que se situe la présente étude.

L'informatique ouvre des perspectives séduisantes dans deux voies différentes de l'hydrologie, correspondant aux deux attitudes possibles et complémentaires de toute étude scientifique, les démarches « inductive » et « axiomatique » (cf. A. PIATIER, 1962). La méthode inductive part de l'observation des phénomènes naturels et, grâce aux mathématiques, grâce aux notions fondamentales de probabilité et de corrélation, ordonne les informations, les simplifie, les compare, cherche à représenter la variabilité des phénomènes si possible par des lois, toutes opérations qui ont pour fin la description plus pénétrante des faits concrets pour les mieux comprendre.

Les débits fluviaux et les éléments constitutifs des combinaisons climatiques qui sont les principaux facteurs de ces débits — les pluies surtout et la température ([24]) — ont été, de bonne heure, des objets privilégiés de la statistique descriptive et analytique (P. MASSE, 1940). Aujourd'hui, l'ordinateur permet d'appréhender une masse telle de données et accélère à tel point les calculs que les modes d'expression sont de plus en plus nombreux, de plus en plus fins et de plus en plus abstraits ([25]). La tentation est forte pour le mathématicien de dévorer les données, de jongler avec elles sans se plier au contrôle du réel. Elle est forte aussi pour le géographe de se cantonner dans une attitude de méfiance globale et sans nuances en risquant à la fois « de surestimer la portée de formules qui lui inspirent une vénération un peu superstitieuse » (cf. E. HALPHEN, 1955) et de négliger un outil qui est peut-être appelé à le décharger dans quelques années, des tâches les plus fastidieuses et les plus rebutantes de la recherche potamologique ([26]).

([24]) d'autant que la climatologie traditionnelle est restée essentiellement « séparative ».

cf., sur la complémentarité des méthodes en climatologie, P. PEDELABORDE (1957 et 1970).

([25]) Le Centre de Traitement de l'Information de la Météorologie Nationale (1970) ne traite-t-il pas, par exemple, en deux heures d'ordinateur, un certain modèle de prévision à quarante-huit heures alors que, pour faire une prévision à vingt-quatre heures, selon le modèle le plus simple, un seul homme mettrait plus de mille ans.

cf. Ch. FOURGEOT, 1970.

([26]) dans les domaines de la collecte des données notamment, de la lecture et du

Mais ce que E. HALPHEN voulait qu'on nommât « l'hydrologie statistique » et non « la statistique appliquée à l'hydrologie » ne se borne pas à cette attitude « inductive ». Elle s'applique à fabriquer des modèles ou des représentations abstraites des phénomènes dont les mécanismes résultent de déductions logiques tirées d'axiomes qui sont des lois de la physique des fluides, par exemple, pour l'écoulement des nappes ou la propagation des crues. Il est également possible à partir d'hypothèses vraisemblables et cohérentes, substituées aux lois expérimentales exactes, de « construire » des modèles régionaux statistiques de pluies et de débits mensuels ou de faire des essais d'identification de la fonction de transformation pluies-débits ([27]). C'est un domaine où l'ordinateur peut être particulièrement efficace : il rend possible des calculs fort longs et complexes donc aussi, en théorie, la représentation des phénomènes dans des conditions qui, par l'intégration de très nombreux paramètres, peuvent être multipliées comme le fait la nature. Pratiquement, il faut que l'ordinateur soit nourri de données conformes au réel, faute de quoi ses inhumaines virtuosités manqueraient complètement leur but.

C'est parce que une partie du haut bassin de la Loire — le bassin de son affluent l'Allier — a fait l'objet d'études particulièrement novatrices en ce domaine que cette présentation des sources d'information doit faire une place à part à ces apports d'un nouveau type. Ils sont essentiellement issus des équipes de chercheurs, ingénieurs hydrauliciens et mécaniciens des fluides, hydrogéologues et statisticiens réunis par E.D.F. (Etudes et Recherches) au Centre de Recherches et d'Essais de Chatou (C.R.E.C.) et, surtout après 1966, au Laboratoire National d'Hydraulique (L.N.H.) de la Faculté des Sciences de Montpellier à l'instigation du Secrétariat Permanent pour l'Etude des Problèmes de l'Eau (S.P.E.P.E.) et avec le concours de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique (D.G.R.S.T.). Les premiers résultats synthétiques ont vu le jour à partir de 1968 ([28]). Ils appellent, selon leurs auteurs, une vérification, une correction, un complément d'information, que doit apporter l'observation de plus en plus rigoureuse des phénomènes naturels, en bref la sanction de la réalité. Finalement, les deux méthodes se doivent un appui mutuel en vue d'atteindre ce qui est le but de l'hydrologie, l'explication la plus complète et la plus générale de l'abondance fluviale.

*
* *

dépouillement par ordinateur de limnigrammes et de pluviogrammes, du calcul des pluies moyennes sur un bassin par planimétrage des surfaces limitées par les isohyètes ....

([27]) cf. Y. CORMARY (1970).

([28]) — Etude de synthèse du C.R.E.C. — J.B./Ext. H.C. 034 (5 décembre 1968). — *Méthodes d'étude régionale des ressources en eau. Application au bassin de l'Allier*. S.M.E.R.S., Université des Sciences et Techniques de Montpellier, 1973.

Parce qu'elle est résolument géographique, la présente étude des précipitations et des écoulements dans le bassin de la Loire en amont de Gien a, du point de vue méthodologique, deux caractères essentiels. Sans négliger les apports de la méthode axiomatique, elle adopte comme point de départ l'examen des faits et s'applique sans originalité particulière à décrire ces faits aussi complètement que possible, restant fidèle à la conception française classique illustrée en hydrologie par les travaux du professeur Maurice Pardé ([29]).

Parmi les faits géographiques qui sont naturellement complexes, les manifestations hydrologiques et climatiques le sont plus que tout autre. Aucun phénomène relevant de la géographie n'est, en effet, plus mobile, plus fugace, plus difficile à saisir. Comment fixer une situation météorologique en tous ses traits évolutifs et singuliers ? En hydrologie, il est très symptomatique qu'aucune station hydrométrique ne peut donner qu'après coup et par une extrapolation incertaine, le débit maximum instantané d'une crue. Ces phénomènes des précipitations et de l'écoulement ne seront pas appréhendés ici isolément. Le but visé est de saisir les deux réalités dans l'acte même de leur dépendance : concrètement il s'agira de retrouver le réel par la confrontation des indices pluviométriques et hydrométriques. La méthode est donc comparative et synthétique — en quoi elle est bien géographique.

Il convient d'abord de discerner le degré de précision qu'il est possible d'atteindre dans cette recherche en fonction des données hydrologiques et pluviométriques fournies par les postes d'observation existant. Ce sera l'objet de la première partie. Il faudra ensuite décrire, analyser, interpréter la vie de la Loire, ses manifestations ordinaires, ses épisodes exceptionnels de pénuries et de crues. Dans une troisième et dernière partie, il s'agira de caractériser et d'expliquer les débits moyens habituels du fleuve et les déficits de l'écoulement.

*
* *

Il reste, après avoir exposé les fins de cette étude, les moyens et la méthode pour les atteindre, à remercier tous ceux qui ont bien voulu me faire profiter de leur savoir, de leur expérience et de leurs propres travaux. A monsieur Pardé, professeur honoraire à l'Université de Grenoble, revient le principal tribut de ma gratitude. Il m'a révélé l'intérêt du sujet et ses nombreux aspects encore inexplorés. Il m'a offert sans réserve non seulement son incomparable expérience et ses vastes connaissances des choses de l'hydrologie mais aussi sa chaleureuse amitié grâce à laquelle sa critique sévère est devenue un encouragement.

([29]) Dans M. PARDE (1964 b), lire notamment la 3ème partie : les moyens de la potamologie. Recours aux mathématiques, et Conclusion. Pages 135 et suivantes.

Ce travail doit aussi beaucoup à l'intérêt que lui a porté le professeur Guilcher qui, alors professeur d'hydrologie à la Sorbonne, a conduit et soutenu mes premiers pas dans la recherche. Ses remarques, dès l'origine du présent travail et au fil des chapitres, ont été des plus précieuses. En monsieur Gachon, professeur honoraire à l'Université de Clermont-Ferrand, m'a été donné un guide toujours disponible de véritables promenades géographiques au cours desquelles la morphologie du Massif Central se faisait pour ainsi dire vivante et riche d'implications humaines et historiques. Monsieur Pédelaborde, professeur à la Sorbonne, a accepté avec grande bienveillance d'examiner mon analyse et mon interprétation des faits météorologiques. La présente étude a aussi profité des judicieux conseils de méthode donnés au cours de plusieurs entretiens par monsieur Péguy, Directeur de recherche au C.N.R.S.. Elle a bénéficié de mes échanges de vue avec monsieur Ph. Bois, de l'Institut de Mécanique des Fluides de la Faculté des Sciences de Grenoble. J'ai pu consulter librement, grâce à l'obligeance de leurs auteurs, la thèse inédite de J. L. Thuillier, ingénieur C.N.A.M., et le mémoire de maîtrise de G. Staron (Saint-Etienne, 1970). De nombreux ingénieurs ont aimablement facilité mes recherches en me faisant connaître rapidement leurs propres observations, en me laissant suivre leurs travaux mêmes sur le terrain, en se prêtant à confronter leurs résultats avec les miens au cours d'entretiens qui ont été un constant stimulant. Doivent à ce titre être particulièrement remerciés monsieur Arléry, ingénieur général, membre du Conseil Supérieur de la Météorologie ; monsieur Turc, maître de recherche au Laboratoire des Sols de l'Institut National de Recherches Agronomiques ; monsieur de Beauregard, de la Direction de l'Equipement d'E.D.F. ; monsieur Jacquet, du C.R.E.C. de Chatou ; monsieur Cormary, du Laboratoire National d'Hydraulique de la Faculté des Sciences de Montpellier ; P. Guillot, de la Division Technique Générale d'E.D.F. à Grenoble ; monsieur Pellecuer, de la Circonscription Electrique Centre et Ouest, et monsieur Barrière, son collaborateur, dont la complaisance a été inlassable ; messieurs Schwirz et Kryn, du Service Hydrologique Centralisateur du Bassin de la Loire à Orléans, monsieur Nizon, du Service d'Annonce des Crues à Orléans, monsieur Lallement, du Service d'Annonce des Crues du Bassin de la Seine ; monsieur Desprez, du Bureau de Recherches Géologiques et Minières ; messieurs Robelin et Gachon de la station de l'I.N.R.A. à Clermont-Ferrand. J'ai pu accéder à des dépôts d'archives peu fréquentés et en tirer commodément parti grâce aux indications éclairées de messieurs Monnier et Charnier qui se sont succédé à la Direction Départementale des Archives du Loiret. Le meilleur accueil m'a été réservé à la Bibliothèque Municipale d'Orléans, à la Société Hydrotechnique de France et à la bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées à Paris. Monsieur Garnier, de la Météorologie Nationale m'a toujours commu-

niqué avec grande obligeance ses patients relevés. Monsieur Bonneviot, directeur de l'Agence Financière de Bassin Loire-Bretagne, m'a donné accès à sa documentation avec une confiance sans réserve. Que tous ceux qui, en portant intérêt à mon entreprise, l'ont encouragée, que tous ceux qui ont aidé à ses progrès, que tous ceux grâce à qui la joie m'est donnée de l'avoir conduite à son terme trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

PREMIERE PARTIE

LES DONNÉES DE BASE SUR LE BASSIN DE LA LOIRE EN AMONT DE GIEN

CHAPITRE I

INVENTAIRE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES ET HYDROMETRIQUES

Toute étude comparative de pluies et de débits commence par une question : avec quelle approximation les observations et les chiffres qui les expriment mesurent-ils la réalité ? Une élémentaire prudence recommanderait l'usage de termes comme « indice pluviométrique » et « indice d'écoulement » de préférence à ceux de « pluies » et de « débits » pour rappeler que les valeurs utilisées résultant de mesures ou de calculs s'éloignent toujours plus ou moins des hauteurs d'eau vraiment précipitées sur le bassin ou des débits réellement écoulés dans les rivières. La défiance envers les chiffres dont il sera fait pourtant grand usage est trop primordiale pour n'être pas d'entrée présentée comme une règle de conduite qui restera constante quand bien même elle sera implicite. Cette défiance n'est pas seulement motivée par l'erreur humaine ou l'erreur systématique liée aux instruments de mesure mais aussi par les modifications qui sont apportées dans les conditions de relevés : une technique de mesure peut être substituée à une autre, la place des appareils peut être modifiée, le lit fluvial peut varier au droit du poste hydrométrique, l'environnement d'un pluviomètre peut être bouleversé, l'aménagement d'une rivière pourra affecter radicalement les relevés ultérieurs etc. (1). Les données numériques doivent donc être critiquées du triple

(1) L'évaluation des débits de l'Allier à la station de Pont-du-Guétin c'est-à-dire au confluent avec la Loire est caractéristique de ces discontinuités qui condamnent à l'échec les tentatives de raccorder des séries de mesures différentes. Depuis 1920, des lectures journalières ont été effectuées par le Service de la Navigation et d'Annonce des Crues (S.A.C.) à une échelle implantée à l'aval du pont puis à une autre située en amont. A partir de 1957, des jaugeages ont été effectués par la 4e Circonscription Electrique, et un limnigraphe installé en 1958. Quand on veut transformer en débits les hauteurs relevées au Guétin par le S.A.C. avant 1957 d'après un barême déterminé par des jaugeages postérieurs à cette date, on découvre des anomalies considérables. Ainsi, en 1946, la somme des débits journaliers à Nevers et au Guétin aurait été supérieure pendant vingt et un jours consécutifs à ceux de Gien. Lors du grand étiage de 1949, le barême appliqué aux hauteurs du S.A.C. donnerait 30 m^3/s. Or le Service de la Navigation a pompé pour l'alimentation du canal latéral tout le débit de l'Allier pendant trois jours consécutifs — et le débit de la pompe est de 6 m^3/s !

point de vue de leur fidélité au réel, de leur homogénéité dans l'espace et de leur continuité.

I. L'INFORMATION PLUVIOMETRIQUE

Elle émane de deux sources essentielles : la Météorologie Nationale et l'Electricité de France. La majorité des postes pluviométriques du bassin sont rattachés au réseau de la Météorologie Nationale qui rassemble dans ses archives et publie en partie (2) les résultats de ses propres observations et ceux d'un bon nombre de postes relevant des administrations des Ponts et Chaussées, des Eaux et Forêts et de l'Electricité de France. Au lendemain de la seconde guerre mondiale, l'Electricité de France a renforcé l'équipement en postes météorologiques des régions montagneuses situées au-dessus de 1.000 mètres et dispose ainsi, dans le haut bassin de la Loire, de quatre-vingt-douze pluviomètres sur environ 4.000 kilomètres carrés, soit sur 11,2 % du bassin jusqu'à Gien. Ces stations relèvent, pour l'ensemble de la France, de la Direction Technique Générale à Grenoble, et, pour le Massif Central, de la Division Technique Générale de Brive (Service de la Production Hydraulique du Massif Central).

De nombreux auteurs, tant étrangers que français, ont étudié depuis longtemps la précision des mesures de pluie en général. Une des plus probantes études en la matière (3), fondée sur les observations du bassin expérimental d'Alrance de 1952 à 1959, conduit à admettre, dans la mesure d'une pluie journalière, un écart entre la pluie réelle et la pluie mesurée inférieur à 15 %, l'erreur à craindre étant d'autant plus grande que la pluie est plus fine ou plus neigeuse et le vent plus fort (4). Sur les valeurs mensuelles ou annuelles de précipitations uniquement pluviales, les écarts seraient respectivement de 8 % et de 2,5 %. En fait, une partie des précipitations sur le bassin de la Loire se fait sous forme de neige. Au Puy, par exemple, pour la décennie 1951-1960, le nombre moyen de jours de chute de neige a été de quarante pour un total de cent quatre-vingt-douze jours de précipitations (GARNIER, 1967), ce qui

(2) Bulletin Quotidien de Renseignements (B.Q.R.), Bulletin Quotidien d'Etudes (B.Q.E.), Résumé mensuel du temps en France, Bulletin annuel du Service Météorologique de la France et de l'Afrique du Nord, 2ème partie : tableau climatologique.

(3) De bonnes bibliographies sur le sujet se trouvent dans R. ARLERY, B. GUILMET et H. GRISOLLET (1962) ; J. JACQUET (1960) ; M.C. COSANDEY (1970).

(4) Par exemple, dans le cas d'une pluie fine d'intensité horaire inférieure à dix millimètres, l'erreur est deux fois plus importante quand la vitesse du vent comprise entre 2,5 et 5 m/s passe à plus de 7,5 m/s. Lors des averses orageuses dont l'intensité est supérieure à 10 millimètres/heure, l'erreur maxima est de l'ordre de 12 % pour des vitesses de vent variant de 1,5 à 13 m/s.

accroît considérablement le risque d'incertitude sur le total annuel de précipitations sans que la proportion de cette erreur soit connue avec précision.

La critique des données pluviométriques pour la France en général et pour le Massif Central en particulier a fait l'objet d'études qui peuvent être considérées comme valables jusqu'à nouvel ordre. Les valeurs moyennes mensuelles et annuelles proposées par A. ANGOT (1911 à 1914) sont sans doute les plus sujettes à caution. Elles sont fondées sur les observations les plus anciennes faites de 1851 à 1900. J. SANSON (1945), sans reprendre les anciennes moyennes de A. ANGOT, a, pour un petit nombre de stations, calculé ses données sur une période plus récente, 1891-1930, au prix d'un « travail considérable de dépouillement, de calculs et de vérifications, qui a nécessité plusieurs années pour être mené à bien » suivant les termes de A. VIAUT, directeur de la Météorologie Nationale, dans la préface de l'ouvrage de J. SANSON. Ce sont des efforts aussi patients de contrôle et de classement qui ont abouti à la publication par M. GARNIER (1967) du recueil relatif aux moyennes 1931-1960, et, très récemment, au calcul des moyennes de 1951 à 1970.

Pour le Massif Central, toutes ces données ont été aussi minutieusement que possible passées au crible par P. ESTIENNE (1956) et R. BALSEINTE (1966). Il suffit de renvoyer à leurs développements sans s'attarder à un travail qui n'offrirait aucune garantie d'amélioration. L'attention a été plutôt portée ici sur les covariations entre les postes voisins, pour apprécier le degré de liaison entre les stations et pour détecter en même temps les erreurs systématiques ou accidentelles de la mesure. La figure 1 montre trois exemples d'application de la méthode dite des « doubles masses », ou mieux de « la ligne des valeurs cumulées », qui a permis d'apprécier les données sur le bassin de l'Ance du Nord et de reconnaître une période récente de quinze années où les corrélations entre les trois stations de Viverols, Saint-Anthême et Passouira sont les plus satisfaisantes ([5]).

La liste des stations pluviométriques recensées ci-dessous dans le tableau n° 2 a été établie dans l'ordre alphabétique suivant trois critères :

— commodité de consultation tout au long de l'étude ;

— ignorance volontaire des classifications géographiques antérieures puisque l'étude se propose, grâce aux manifestations hydrologiques, d'aborder le problème des limites climatiques régionales sur lesquelles les auteurs ne sont pas d'accord ([6]) ;

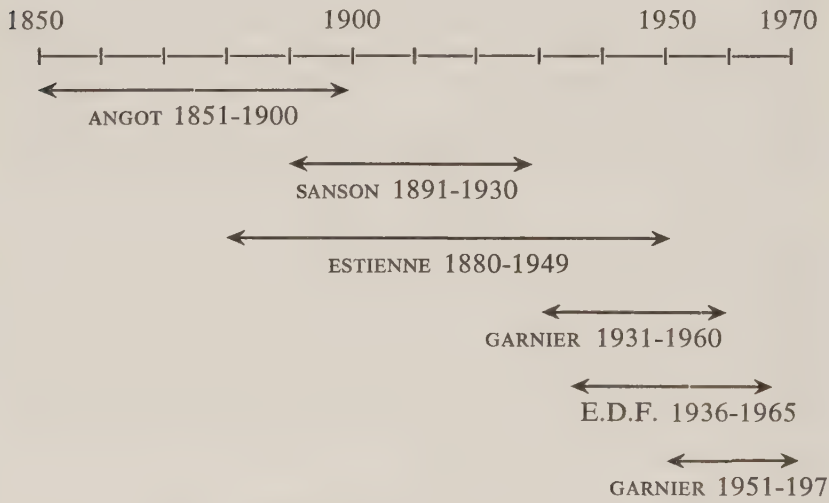
— omision des organismes responsables des observations puisque, actuellement, toutes les données sont à peu près rassemblées par la

([5]) D'autres exemples d'application de cette méthode sont commentés par M. ROCHE (1963).

([6]) M. BILLAUT, P. BIROT, D. CAVALIER, P. PEDELABORDE (1956) ; P. ESTIENNE (1956) ; L. GACHON (1946) ; A. MITARD (1927) ; H. ONDE (1923) ; M. PARDE (1919).

Météorologie Nationale qui doit devenir un véritable centre distributeur d'information quand toutes les données pluviométriques existant en France auront été mises sur cartes perforées.

Les deux cent quarante et une stations de cet inventaire se trouvent dans les limites du bassin étudié ici (7). Le département où chacune est située, leurs coordonnées géographiques (8) et leur altitude permettent de les localiser. La date d'origine des séries de données continues a été portée dans une colonne, ainsi que le nombre total d'années d'observations consécutives ou non. Quand les valeurs moyennes de hauteurs annuelles ont été calculées par A. ANGOT, J. SANSON, P. ESTIENNE, M. GARNIER ou par l'E.D.F., elles ont été reportées dans des colonnes distinctes. Les moyennes relatives à la décennie 1956-1965 y ont été ajoutées. Le schéma ci-dessous figure l'étendue respective des séries auxquelles s'appliquent les diverses moyennes annuelles globales.



Les caractéristiques techniques des appareils de mesure (9) n'ont pas été indiquées car elles ont finalement beaucoup moins d'importance que le

(7) En fait, pour les calculs de lames d'eau précipitées sur le bassin et le dessin des isohyètes, de nombreuses stations hors du bassin ont été utilisées.

(8) Les coordonnées sont le seul moyen de repérer exactement l'emplacement d'un pluviomètre qui n'est pas nécessairement dans l'agglomération de la commune qui le désigne. Elles sont portées ici pour une raison de plus : elles serviront, après traduction des degrés en système métrique ou en grades, à inscrire la position des pluviomètres sur les fiches mécanographiques qui fourniront aux machines électroniques les éléments nécessaires au dessin des isohyètes. La méthode en est encore au balbutiement des mises au point.

(9) Elles ont été consignées et mises à jour dans la notice d'exploitation du S.M.M. (Service Météorologique de la Métropole) « Réseau instrumental d'exploitation ».

site du pluviomètre, l'intensité de l'averse ou l'influence du vent sur la valeur des mesures ([10]).

La première remarque évidente à la lecture du tableau n° 2 est le nombre relativement faible des pluviographes (stations soulignées dans le tableau) qui, seuls, renseignent sur l'intensité horaire de la pluie, donnée indispensable à l'étude des averses génératrices de crues. Sept d'entre eux relèvent du Service de la Production Hydraulique d'E.D.F. (Brive) :

à Versilhac depuis avril 1954,
à Langogne et à Issarlès depuis juillet 1954,
à Thoras depuis avril 1956,
à Usclades-et-Rieutord depuis septembre 1964,
à Valcivières depuis mai 1965,
à La Chaze (St. Etienne de Lugdarès) depuis mars 1967.

Les dix autres ombrographes ([11]), plus anciens, appartiennent au réseau des « stations » climatologiques de la Météorologie Nationale où les observations sont faites par le personnel de cette administration et non par des observateurs bénévoles comme dans les « postes » pluviométriques qui sont, de loin, les plus nombreux. En ces derniers points les relevés sont faits une fois par jour, à sept heures, la hauteur d'eau portée au compte de la journée étant, en fait, le résultat de précipitations tombées en grande partie la veille.

La longue liste de ces pluviomètres peut porter à conclure un peu vite que la documentation pluviométrique sur le bassin est d'une grande richesse. L'examen de leur densité et surtout de leur répartition par tranches d'altitude permet de nuancer cette seconde impression d'ensemble.

Avec une moyenne d'un pluviomètre pour 155 km², le bassin considéré est sans doute bien pourvu par rapport à la France entière où la densité est à peu près d'un poste pour 200 km². Mais est-ce suffisant pour une région montagneuse où les accidents du relief multiplient les contrastes d'altitude et d'exposition ? Si l'on en croît G. REMENIERAS (1960, page 94), « un bassin versant de 2.000 km² du Massif Central français semble bien équipé, en vue du contrôle de la corrélation pluie/débit, avec une trentaine de pluviomètres dont un quart sont des appareils enregistreurs », soit un pluviomètre pour 67 km². Or, si l'on décompose les 35.890 km² draînés par la Loire à Gien en plusieurs

([10]) Sur le terrain expérimental d'Alrance, « il apparaît que l'écart entre les mesures de pluie à 1 m 50 et 0 m 30 au-dessus du sol est moins important en ces stations qu'on ne l'aurait pensé d'après les résultats de comparaisons semblables effectuées ailleurs. L'écart systématique observé entre un pluviomètre à 1 m 50 et un pluviomètre à 0 m 30 au-dessus du sol ne dépasse pas en ordre de grandeur l'erreur admissible sur la mesure de pluie au pluviomètre à 1 m 50 » (J. JACQUET, 1960).

([11]) Château-Chinon, Mont-Saint-Vincent, Nevers, Puy-de-Dôme, Le Puy-Chadrac, Saint-Etienne-Bouthéon, Saint-Yan, Tarare, Vichy-Charmeil, Clermont-Ferrand.

parties, il apparaît que le bassin de l'Allier (un pluviomètre pour 127 km²) est mieux équipé que celui de la Loire à la confluence (un pluviomètre pour 165 km²) et que les hauts bassins des deux rivières ont, respectivement,

1 pluviomètre pour 85 km² (Loire à Bas-en-Basset, 3.300 km²),
1 pluviomètre pour 87 km² (Allier à Vieille-Brioude, 2.260 km²).

Le tableau n° 1 et les quatre diagrammes de la répartition des pluviomètres comparée aux fréquences altimétriques (figure 2) mettent en évidence l'effort d'équipement du bassin de l'Allier dans la tranche d'altitude de 1.000 à 1.200 mètres mais une relative carence entre 1.200 et 1.400 mètres alors que plus du quart du bassin à Vieille-Brioude se développe à cette altitude ([12]). Sur la haute Loire, avant Bas-en-Basset, c'est entre 800 et 1.200 mètres d'altitude que l'exploration est déficiente : avec plus des deux tiers du bassin (68 %), cette zone d'altitude ne possède que 56 % des pluviomètres.

A ces hétérogénéités touchant à la valeur des observations pluviométriques et à leur répartition dans l'espace, s'ajoutent deux défauts concernant leur durée : malgré l'ancienneté du réseau, les séries de données sont brèves et les appareils ont été installés à des dates plus ou moins récentes suivant les tranches d'altitude.

Dès la fin du XIXème siècle, le réseau des pluviomètres était assez dense pour que A. ANGOT puisse calculer les « normales » de cinquante ans (1851-1900) en trente stations bien réparties sur le bassin ([13]). Les seuls « udomètres » relevant du Service Hydrologique d'Annonce des Crues étaient au nombre de quarante-quatre. Et, grâce au dépouillement très minutieux de P. ESTIENNE pour ramener les moyennes pluviométriques à la période s'étendant de 1880 à 1949, les données de soixante-dix stations peuvent être utilisées pour l'étude du haut bassin ligérien.

Mais, en fait, les chiffres d'ANGOT surtout et même ceux de P. ESTIENNE résultent, dans une très large mesure, d'interpolations souvent hasardeuses (P. ESTIENNE, 1956, p. 15) et les séries continues sont fort rares. Malgré l'ancienneté de nombreux postes, quatre ou cinq seulement offrent actuellement des séries complètes débutant avant 1900. Les lacunes plus ou moins longues de quelques mois ou de plusieurs années sont dues autant à des interruptions de l'observation qu'à des destructions d'archives, les

([12]) Le nombre des pluviomètres retenu dans le tableau n° 1 est de 231 alors que la liste en comporte 241. La différence résulte de la suppression de dix postes dont les valeurs anciennes seront très utiles dans le cours de l'étude.

([13]) La distribution était la suivante :
5 postes, soit 16,7 % du total, au-dessous de 250 mètres (pour une tranche d'altitude représentant 18 % du bassin),
10 postes, soit 33,3 %, de 250 à 500 mètres (37 % du bassin),
9 postes, soit 30 %, de 500 à 1.000 mètres (43,5 % du bassin),
6 postes, soit 20 %, au-dessus de 1.000 m (10,5 % du bassin).

unes et les autres étant multipliées pour la période comprise entre 1920 et 1939. Si bien que, si la date originelle des données continues est retenue plutôt que celle de mise en service du poste (tableau n° 2), il apparaît que, pour la majorité des pluviomètres (62 %) actuellement dénombrés, les séries n'excèdent pas vingt-cinq ans et le quart des stations n'ont pas plus de vingt ans de relevés continus.

Or cette brièveté des séries d'observation suivies affecte principalement deux domaines du bassin : le plus élevé où les pluies sont précisément les plus fortes et les plus influencées par les accidents locaux du relief et, surtout, l'ensemble compris entre 250 et 500 mètres. Tandis que de 500 à 1.000 mètres le tiers des séries sont « longues » (relativement, s'entend) c'est-à-dire composées de plus de vingt-cinq ans de données, au-dessus de 1.000 mètres la proportion des séries « longues » est seulement du quart et, entre 250 et 500 mètres, elle n'est plus que du cinquième. Que les données anciennes soient relativement nombreuses entre 500 et 1.000 mètres ne surprend pas dans une région de moyenne montagne, d'habitat plutôt dispersé et de peuplement particulièrement dense jusqu'aux dernières décades du XIXème siècle. Au-dessus de 1.000 mètres, non seulement les postes pluviométriques sont plus récents mais les séries « longues » sont moins longues et remontent le plus souvent à la décennie 1927-1936, période où l'équipement pluviométrique fut surtout dû à l'intérêt nouveau porté aux ressources hydroélectriques.

C'est au-dessous de 500 mètres que les séries « anciennes » sont les plus longues et les séries « récentes » sont les plus courtes, deux traits particulièrement désavantageux pour la présente étude puisque, dans les basses altitudes du bassin, l'évaluation des débits, en général très négligée, devrait être fondée principalement sur une bonne connaissance des pluies. Ce fait donne un premier exemple des discordances entre les informations pluviométriques et hydrométriques, défaut qui crée une des principales difficultés de l'étude. Aussi, est-ce avant tout en fonction de l'information sur les pluies qu'il convient de résumer ici les qualités et les insuffisances des documents hydrométriques disponibles.

II. NATURE, RICHESSE ET LIMITES DE LA DOCUMENTATION HYDROMETRIQUE

A. Dualité de l'information hydrologique : hauteurs d'eau et débits

Alors que les précipitations sont toujours exprimées en hauteurs d'eau quels que soient le type de pluviomètre utilisé et l'administration dont relèvent les observateurs, les données hydrométriques sont de deux espèces : des hauteurs d'eau atteintes par les rivières aux échelles ou hydrographes implantés par l'administration des Ponts et Chaussées, ou

bien des débits calculés en certains lieux, stations de jaugeage ou stations-usines, par les Circonscriptions Electriques ou par l'Electricité de France.

1. *Hauteurs d'eau*

Le réseau actuel des cinquante-neuf stations limnimétriques en amont de Gien dépendant du Service Hydrologique Centralisateur du Bassin de la Loire à Orléans ([14]) est le pâle héritier de celui qui fut mis en place, il y a plus d'un siècle (104 échelles en 1919) en vue de l'annonce des crues, par les ingénieurs de la même administration des Ponts et Chaussées du même centre d'Orléans ([15]). Le rôle assigné à ce réseau est resté le même dans la prévision des crues. Et, en dépit des perfectionnements successifs apportés par COMOY en 1858, SAINJON en 1878 puis en 1883, JOLLOIS en 1881, MAZOYER en 1890, BACHET en 1934 ([16]), ce sont à peu près les mêmes règles techniques qui sont appliquées aujourd'hui à la prévision. Le principe en est simple : il est fondé sur la correspondance entre les hauteurs d'eau observées en amont puis en aval, compte tenu du temps de propagation moyen entre les stations successives et de l'apport des affluents intermédiaires. La hiérarchie des stations est restée la même dans chacune des sections contrôlées par les centres de prévision de Saint-Etienne, Nevers, Clermont-Ferrand et Orléans (figure 3). Les hauteurs constatées aux stations secondaires

([14]) Le Service Hydrologique Centralisateur institué par l'arrêté du 18 janvier 1962 du Ministère des Travaux Publics et des Transports est placé sous l'autorité du directeur des Ports Maritimes et des Voies Navigables. Ce nouveau service, pris en charge par le Service des Ponts et Chaussées du Loiret à Orléans, est chargé de rassembler à l'échelle du bassin de la Loire la documentation hydrologique des services départementaux des Ponts et Chaussées chargés de l'annonce des crues et de la défense contre les inondations, sans réduire pour autant la compétence de ces services départementaux en la matière. Le S.H.C. dirige, en outre, les études et les travaux se rapportant aux débordements du fleuve, à l'entretien du lit et à ses modifications naturelles ou artificielles etc.

([15]) L'application de la décision ministérielle de 1847 créant un service régulier d'annonce des crues dans le bassin de la Loire fut l'œuvre de M. COLLIN, nommé peu auparavant ingénieur en chef de la Loire à Orléans. Un service hydrométrique fut centralisé en 1853 dans cette ville avec mission d'annoncer les crues non seulement d'après les renseignements recueillis dans les contrées que traversent la Loire et ses principaux affluents dès que les eaux dépassaient de trois mètres leur étiage mais dès le moment où elles se manifesteraient sur les points les plus éloignés du bassin. La première tentative de ce genre en France aurait été faite vers 1845 pour le Rhône et la Saône par l'administration municipale de Lyon.

([16]) Le nom de BACHET reste attaché aux « réglettes », sortes de barèmes étalonnés d'après l'analyse rationnelle de la propagation des ondes de crues, et qui servent au dessin des graphiques de prévision. Leur utilisation exige cependant un sens critique et une révision périodique des graduations, en fonction notamment des modifications du lit, pour éviter certaines déconvenues.

cf. BACHET (1934 et 1948) ; BACHET et BEAU (1940) ; ROBERT (1968).

sont transmises aux stations principales pour lesquelles des prévisions sont faites. Parmi ces « relais » d'amont, Bas-en-Basset, Roanne, Digoin, Parentignat, Vichy, Moulins et Givry transmettent les hauteurs à Orléans où les graphiques de prévision sont dessinés pour les échelles d'Orléans, Blois, Tours puis Langeais et Saumur.

En fait, les observations pluviométriques qui, dans la pensée des créateurs du Service, devaient assurer la prévision ont joué un rôle de plus en plus réduit. Déjà en 1894, A. BABINET signalait en ces termes le manque de coordination qui devait se confirmer par la suite : « Théoriquement, quand la pluie est tombée, l'importance de la crue qui en résulte devrait être connue. Mais la relation qui existe entre ces deux faits est des plus compliquées car elle dépend d'une foule d'éléments divers... Aussi, sauf dans certains cas particuliers, n'est-ce pas d'après les observations sur la pluie mais d'après les niveaux des petites rivières d'amont que se font les prévisions ».

Pour ces petites rivières et pour les grandes artères, les archives départementales des Ponts et Chaussées conservent des séries remarquables de lectures journalières des hauteurs d'eau aux échelles, dont la durée précisée sur le tableau n° 3 dépasse presque toujours quarante ans. Elles constituent un bon outil pour la description et la classification des crues anciennes, pour l'étude de la propagation et de la concordance des ondes élémentaires puisque les données sont détaillées et que les échelles sont bien réparties sur tout le bassin ([17]). Mais leur intérêt est gravement limité par l'insuffisance des données sur la pluie : celles-ci, dans les meilleurs cas, sont seulement des hauteurs d'eau totalisées en vingt-quatre heures et ne renseignent ni sur l'abondance ni sur l'intensité ni sur la chronologie des averses particulières génératrices de crues ([18]).

Pour l'étude plus statique des bilans mensuels ou annuels que permettent cependant des données pluviométriques si sommaires, les lectures aux échelles sont, en revanche, quasi inutilisables. Leur traduction en volumes d'eau qui passe implique une opération très aléatoire de transformation des hauteurs d'eau en débits à laquelle des jaugeages actuels n'apporteraient aucune garantie de contrôle. La largeur et la

([17]) Les lectures, habituellement journalières, sont multipliées en temps de crue. Voici, par exemple, le rythme adopté à Langogne sur le haut Allier : une fois par jour quand la hauteur d'eau à l'échelle est inférieure à 1 m 50 ; trois fois par jour (7 h - 12 h - 16 h) entre 1 m 50 et 2 m 50 ; quatre lectures (7 h - 12 h - 16 h - 20 h) entre 2 m 50 et 3 m 50 et toutes les deux heures au-dessus de 3 m 50.

([18]) Le décalage entre les vingt-quatre heures d'un jour officiel et les vingt-quatre heures séparant les opérations fixes est une source d'erreurs. La hauteur d'eau recueillie dans le pluviomètre, une fois par jour généralement, est mesurée à 7 heures du matin. La pluie marquée au compte du jour J comprend la pluie tombée du jour J à 7 heures au jour J + 1 à 7 heures. En principe, les chiffres relevés chaque jour à l'heure habituelle sont reportés sur le registre à la veille de l'observation mais il arrive qu'ils soient attribués au jour même de l'observation.

profondeur des lits sont rarement assez stables pour que les cotes relevées aujourd'hui aient à peu près la même signification qu'autrefois, surtout dans les régions montagneuses du bassin et celle du Val dans la partie moyenne. M. JOLLOIS (1881), L. GALLOUEDEC, H. ONDE, R. DION et M. PARDE ont sans doute tiré le meilleur parti de cette documentation riche mais partielle et dispersée.

2. *Débits*

En regard, l'information sur les débits aux stations de jaugeage a d'abord l'avantage de permettre la comparaison directe de l'abondance fluviale et des volumes d'eau précipitée sur les bassins versants. Son second mérite tient à la continuité dans l'observation puisque l'hydrographe (ou limnigraphe) enregistre les moindres variations de niveau de la rivière au point où il est implanté. Enfin, les vérifications des relations hauteurs/débits par des jaugeages nombreux assurent, pour la plupart des stations, malgré les causes d'erreurs bien connues qui faussent toujours les calculs des débits ([19]), des résultats assez proches des valeurs réelles avec une précision de l'ordre de 2 à 3 % à ce qu'il semble en général sur le module particulier.

Le jaugeage des cours d'eau et, par conséquent, la détermination des débits est, depuis 1917, une attribution essentielle des Services des Grandes Forces puis des Forces Hydrauliques, auxquelles ont succédé, en 1941, les Circonscriptions Electriques. La 4ème Circonscription Electrique, devenue Circonscription Electrique Centre et Ouest, n'en a pourtant pas l'exclusivité. Elle gère cinquante stations sur soixante-seize que compte le bassin en amont de Gien. Mais les jaugeages des Ponts et Chaussées, du Génie Rural ou du B.R.G.M. ont toujours une fin limitée et ne donnent lieu à aucune publication. L'Electricité de France exploite, pour sa part, trente et une stations dont treize stations-usines où les débits sont directement déduits de l'équivalence entre l'énergie produite et le volume d'eau turbinée, ce mode d'évaluation exposant à l'erreur dans le cas des usines anciennes et pour les gros débits déversés.

([19]) M. PARDE a souvent dénoncé ces risques d'erreurs, notamment dans « Fleuves et Rivières » (1964), pp. 61-76, et dans sa thèse de doctorat es Sciences (1949). Les fautes sont de trois sortes. Elles peuvent résulter d'une mauvaise courbe de relations hauteurs/débits, d'autant plus incertaine que les jaugeages sont peu nombreux, le lit de la rivière variable et la section mouillée complexe. Pour presque toutes les stations, les courbes sont extrapolées vers le haut et vers le bas pour obtenir les débits correspondant aux cotes des plus grandes crues au cours desquelles les rivières ne peuvent pas être jaugées, ou aux cotes des étiages très faibles. La seconde source d'erreurs, généralement moins graves, provient de la méthode de calcul des débits journaliers. Enfin, la qualité des appareils, leur maniement plus ou moins aisé, la longueur des calculs et l'application de formules exposent aussi à des erreurs matérielles.

Le principal trait de ces réseaux dont les composantes sont décrites dans le tableau n° 4 est la jeunesse puisque 57 % (quarante-trois sur soixante-seize) des stations ont été mises en service après 1945. Si l'on tient compte des tâtonnements de l'installation, du rodage des observateurs et des appareils, du délai requis pour établir la courbe de tarage, on peut considérer que la majorité des séries, quand elles ne sont pas interrompues par des événements fortuits ([20]), n'ont pas vingt ans de débits à peu près sûrs. Elles ne suffisent donc pas pour apprécier et prévoir correctement l'abondance moyenne fluviale. Comme l'implantation de ces stations est en étroite corrélation avec le renforcement de l'équipement pluviométrique d'altitude par l'Electricité de France au lendemain de la seconde guerre mondiale, des études précises de bilans particuliers et de bilans de crue notamment peuvent toutefois être tentées.

Pour les dix-neuf stations les plus anciennes, équipées entre 1918 et 1920, les débits n'ont pas toujours été calculés de manière à inspirer confiance et les chiffres relatifs à certaines de ces stations ne sont pas assurés pour toute la période des relevés. L'exemple des cinq stations fondamentales peut être pris pour rappeler la prudence nécessaire dans l'utilisation des chiffres dont la publication ne garantit pas l'exactitude.

La station de BAS-EN-BASSET, sur la Loire, mise en service en 1918, équipée d'un limnigraphe dès 1925, est une des meilleures du bassin. Bien que le lit au droit de l'échelle soit sableux et très sensible aux crues qui provoquent des détarages fréquents, les jaugeages nombreux et échelonnés dans le temps ont permis de bien préciser les courbes hauteurs/débits successives dans leurs parties basses et moyennes pour que l'instabilité du lit ne nuise pas trop à la précision des résultats. Toutefois, cette instabilité interdit d'utiliser, pour une étude des débits relatifs aux années antérieures à 1918 les lectures faites par le S.H.A.C.

A VIEILLE-BRIOUDE, sur l'Allier, c'est à partir de 1945 seulement que les résultats peuvent être considérés comme bons bien que la station soit, comme la précédente, en service depuis 1919. Les raisons en sont multiples : fond instable de sables et de galets ; impossibilité de jauger précisément les basses eaux avant l'adoption, à cette fin, d'une meilleure section à l'aval ; déficiences dans l'observation, qui ont obligé à établir, de 1941 à 1944, environ vingt-cinq mois de lectures fictives par recoupement avec les stations d'amont et d'aval.

([20]) En plus de mauvais fonctionnements des appareils, il arrive que le gel bloque les limnigraphes des stations les plus élevées. Les crues, dans leur fureur, emportent parfois l'appareil enregistreur et provoquent des modifications du lit telles qu'elles appellent une reconstitution complète de la courbe de tarage. Ainsi, la crue exceptionnelle de la Seuge, le 16 juin 1951, détruisit quatre ponts, noya l'usine électrique de Luchadou, submergea le village de Prades au confluent avec l'Allier et laissa l'ancien lit exhaussé de deux mètres environ au-dessus du village...

Ce sont les mêmes progrès apportés à la connaissance des débits depuis 1949 qui ont permis d'améliorer sensiblement les résultats de la Dore à GIROUX après 1943.

La Sioule à PONT-DU-BOUCHET a un lit très stable et, malgré l'absence de jaugeages en crues, la courbe des débits a pu y être extrapolée d'une manière qui semble assez précise grâce aux évaluations de débits de crue faites aux usines d'aval des Fades.

Autant d'avantages qui, par malheur, font défaut à GIEN. Le fond y est peu stable et, en dépit de l'attention persévérante portée à la station depuis un siècle, la courbe des débits est l'objet de retouches constantes. De nombreux jaugeages dont les résultats ont été conservés y ont déjà été exécutés avec soin entre 1857 et 1874. Après un temps d'arrêt — ou de lacune dans les archives — ils ont repris entre 1900 et 1910 et, en 1929, une nouvelle campagne fut inaugurée par le Service des Eaux et de l'Assainissement de la Ville de Paris qui exploitait la station depuis 1918 et y opéra une centaine de jaugeages jusqu'en 1949. A cette date, la 4ème Circonscription Electrique prit en charge la station et n'a pas cessé depuis lors d'y étudier minutieusement les débits avec le concours du service des Ponts et Chaussées d'Orléans en vue, d'une part, de valoriser les séries anciennes de lectures aux échelles, qui remontent à 1861, et, d'autre part, de vérifier les valeurs de débits donnés pour 1920 à 1949 et dont l'exactitude n'est pas garantie.

Les campagnes répétées de jaugeages ont permis d'étalonner la courbe pour les faibles débits et de prolonger avec de plus en plus de certitude son tracé vers le haut. Les débits moyens et forts étaient, en effet, jusqu'à une date récente, particulièrement mal connus, les jaugeages de 1929 à 1949 ayant tous été effectués lors de débits inférieurs à 100 m^3/s. Or, pour cette période, l'ordre de grandeur du module est de 345 m^3/s et les crues, sans être exceptionnelles, atteignent 1.500 à 2.000 m^3/s. Aux services des Ponts et Chaussées d'Orléans, revient le mérite d'avoir jaugé à Givry en amont de Gien, au cours de la crue de décembre 1968, les plus forts débits de la Loire jamais jaugés dans ce secteur. Cette opération a permis, une fois de plus, d'améliorer la courbe de tarage de Gien dans sa partie supérieure puisque, le 29 décembre 1968, l'eau y a atteint la cote de 4 m 78, ce qui correspond à un débit de 2.810 m^3/s.

Quand l'évaluation des débits se révèle si laborieuse aux stations les plus anciennes et les plus surveillées, la valeur de données portant sur de très courtes périodes en des stations où le lit est souvent modifié peut sembler douteuse, surtout quand les débits de basses et de hautes eaux sont fortement contrastés.

L'étude synoptique et comparée à différentes échelles peut, seule, pallier la fragilité de la documentation et confirmer ou démentir certaines hypothèses ou connaissances acquises sur l'abondance moyenne.

B. Des rivières naturelles, chance du chercheur

Le bassin de la Loire est, en France, celui qui se prête le mieux à ce genre d'étude parce que les débits des rivières, en dépit des difficultés précédemment énoncées, sont en majorité naturels ou peu influencés. En cinquante-six stations sur soixante-seize, les débits mesurés sont naturels. C'est pour cette raison que le bassin de l'Allier a été choisi par l'E.D.F. comme domaine privilégié de ses recherches théoriques et appliquées (cf. Introduction).

Les aménagements actuels peuvent être classés en trois groupes suivant leurs effets respectifs sur les débits.

Premier groupe

Les usines hydroélectriques de faible puissance dont dix classées dans le répertoire des stations de jaugeage (tableau n° 4) comme stations-usines de l'E.D.F. n'ont pratiquement pas d'influence sur les débits ([21]). Elles se prêtent même parfois à de bonnes mesures journalières des rivières naturelles qu'elles utilisent d'après les volumes d'eau turbinés et déversés et d'après les variations de la réserve.

([21]) Ce sont essentiellement les usines de :

— Saint-Etienne-du-Vigan sur l'Allier,

— Luchadou sur la Seuge,

— Arlanc et Olliergues sur la Dore,

— Sauviat associée d'un double barrage sur la Dore et sur le Miodex,

— sur la Sioule, les trois barrages et usines de Queuille (1905, volume de la réserve utile : 2,4 millions de m^3), Les Fades (1917, volume de la réserve utile : 2,4 millions de m^3), les Garachons (1919),

— sur la Loire, Charentus (barrage-usine, 1919), Brives-Charensac, Lavoûte et La Vourdiat,

— sur le Lignon-du-Velay, les vieilles usines de Pont-de-Lignon I (1897) et II (1905),

— sur l'Ance du Nord (ruisseau de l'Enfer), le barrage de Pradeaux (réserve utile : 2 millions de m^3) qui détourne les eaux vers l'usine de Grandrif sur la Dore, l'usine de Laprat et le barrage de Passouira-usine de Moulas (1916),

— sur le Lignon-du-Forez, le barrage-usine de Rory (1927) et l'usine de Saint-Martin,

— sur l'Aix, les usines de Gour Saillant et Chizonnet,

— sur la Besbre, le barrage-usine de Chatel-Montagne (1931, réserve utile : 1,2 million de m^3).

cf. • Atlas hydroélectrique, Chambre Syndicale des Forces Hydrauliques. Paris, 1945 — mis à jour en 1948 ;

• Centrales hydrauliques, réservoirs et centrales thermiques en France. Direction du Gaz et de l'Electricité, 1955 ;

• Centrales hydrauliques françaises d'une puissance installée supérieure ou égale à 1.000 kva — Caractéristiques au 1er janvier 1965. E.D.F.

Deuxième groupe

Les réservoirs de plusieurs barrages modifient, au contraire, le régime par le jeu des retenues et des lâchures : ce sont, dans l'ordre chronologique de construction, le barrage d'Alleyras-Poutès sur l'Allier (usine de Monistrol d'Allier), de La Valette sur le Lignon du Velay (usine de Versilhac), de Grangent sur la Loire et de Besserve sur la Sioule (tableau n° 5). Les débits journaliers et les valeurs moyennes mensuelles sont les plus perturbés mais l'objet même de ces barrages destinés à la production hydroélectrique implique qu'ils soient pleins de manière à répondre à la demande d'énergie quand elle se manifeste et, malgré l'ampleur de la capacité de retenue, les effets sur les crues notamment sont quasi négligeables. L'exemple de Grangent, le plus grand d'entre eux est particulièrement expressif. La capacité totale de sa retenue est de 57,4 millions de m^3 et sa capacité utile de 28,6 millions de m^3. Sur la figure 4, ont été portés, pour l'année 1961, en regard des variations de la réserve, les débits de chaque jour aux stations de Bas-en-Basset, à une dizaine de kilomètres en amont du barrage, et de Villerest, 85 kilomètres à l'aval au delà de la plaine du Forez et des gorges du horst cristallin de Neulize. Les oscillations journalières, très nettes d'octobre à avril sur la courbe de Villerest, sont en rapport direct avec les variations de la réserve de Grangent. Celle-ci reste en moyenne très stable si bien qu'elle n'a pratiquement pas d'effet d'amortissement même sur l'intumescence très faible du 11 décembre. La crue de février qui n'est même pas de fréquence décennale a déplacé à peu près 150 millions de m^3, soit plus de cinq fois la capacité utile du réservoir !

La crue de novembre 1968 n'a certainement pas été amortie par le barrage de Grangent puisque le débit, à Bas-en-Basset, augmenté de l'apport de la Semène, se retrouve à Villerest. Quant au débit évalué à Grangent, il est à coup sûr inexact. Les chiffres publiés sont les suivants :

à Bas-en-Basset, 705 m^3/s, le 2 novembre 1968,
au Crouzet, sur la Semène, 11,8 m^3/s,
à Grangent, 1.120 m^3/s ! à 10 ou 20 % près,
à Villerest, 700 m^3/s, le 3 novembre.

Cela donne, par parenthèses, la mesure des erreurs qui peuvent être faites sur l'extrapolation des débits de crue dans les stations-usines récentes à barrage-réservoir, et montre une fois de plus l'intérêt des études de corrélation entre stations d'un même bassin.

Troisième groupe

D'un autre type sont les influences dues à des prélèvements. Beaucoup ne sont pas mesurés, et d'abord ceux de l'agriculture. Les prélèvements d'eau pour les usages urbains seraient plus faciles à connaître à l'échelle du bassin à condition de savoir quelle part de cette eau est

effectivement consommée et quelle part est rejetée dans les rivières. Les prélèvements pour la navigation, très faibles et très irréguliers, sont toujours inférieurs à la marge d'erreur admise sur les mesures des débits de la rivière influencée. Si, à l'échelle du bassin et dans un bilan global annuel, tous ces prélèvements peuvent paraître minuscules (22), ils le sont moins aux échelles locales et mensuelles et peuvent beaucoup modifier le régime de certaines rivières (23).

Les aménagements de Montpezat A influencent fortement les débits. Ils détournent vers l'Ardèche (par l'intermédiaire de son affluent, la Fontaulière) une grande partie des eaux précipitées sur 200 kilomètres carrés du haut bassin de la Loire et accumulées dans les trois réservoirs du lac d'Issarlès, du Gage et de La Palisse, dont la capacité totale utile est de 42,6 millions de m³. La centrale de Montpezat peut turbiner 22,6 m³/s, mais, en été, son influence sur les débits est nulle (24). La part

TABLEAU N° 6

ROLE DES PRELEVEMENTS DE MONTPEZAT A SUR LE MODULE DE LA LOIRE A CHADRAC, BAS-EN-BASSET ET GIEN

Année	*Débit prélevé (en m³/s)*	*Part prélevée sur le module (%)*		
		CHADRAC 1.312 km²	*BAS-EN-BASSET 3.300 km²*	*GIEN 35.890 km²*
1961	6,7	41	21	2,7
1962	4,9	37	19,2	1,8
1963	9,8	35	15,8	2,8
1964	6,5	44	17,6	3,2
1965	6,1	31	15	1,4
1966	5,7	30	12,6	1,4
moyenne 6 ans				
	6,6	36,4 %	16,8 %	2,2 %

(22) D'après l'Agence Financière de Bassin (1967), le volume des prélèvements autorisés est de l'ordre de 100 millions de m³ par an, soit un peu moins du 1/100ème du volume d'eau écoulé annuellement à Gien.

(23) Ainsi, le 1,2 m³/s pompé en moyenne dans le réservoir de La Valette pour les besoins en eau de Saint-Etienne représente, pour le Lignon-du-Velay, 14 % du débit moyen mensuel des mois de plus grande abondance (avril : 8,66 m³/s et novembre : 8,64 m³/s, pour la période 1931-1965) et 83 % du débit moyen du mois d'août.

(24) Suivant le cahier des charges, elle est tenue de maintenir en cette saison un certain débit à l'aval et de ne pas abaisser le niveau normal du lac d'Issarlès du 15 juin au 15 septembre pour ménager les intérêts du tourisme.

de ponction opérée sur le débit moyen annuel diminue vers l'aval pour atteindre un maximum d'environ 3,5 % à Gien.

L'influence de Montpezat sur les débits de crue est forte. Aucune ne passe sans que son maximum ne soit au moins amorti. Sur vingt-quatre crues étudiées (G. STARON, 1970) depuis la mise en service de l'usine jusqu'en 1968, six ont été complètement supprimées et l'amortissement du maximum a été, en moyenne, de :

71 % pour les 10 crues observées de décembre à mars,
91 % pour les 8 crues observées de mars à juin,
19 % pour une crue observée de juin à octobre,
21 % pour les 5 crues observées d'octobre à décembre.

En regard de ces cas extrêmes de perturbation qui interdit toute comparaison entre les eaux précipitées et les eaux écoulées, l'avantage des rivières naturelles pour la présente étude n'est plus à démontrer.

C. **De grosses lacunes dans l'information hydrométrique**

La liste imposante des soixante-seize stations de jaugeage (tableau n° 4) ne doit pourtant pas faire illusion sur les superficies explorées : les trois quarts des stations sont situées à l'issue de bassins versants de moins de 1.000 km² chacun et qui couvrent au total 10.062 km² seulement sur les 35.890 que draîne la Loire en amont de Gien. Sur ces bassins, au nombre de cinquante-sept, onze seulement ont plus de 500 km². La classe modale est celle des petits bassins de moins de 100 km² (figure 5).

La carte de localisation des bassins dont on connaît directement l'écoulement par jaugeages laisse en blanc de très grandes étendues (figure 6). Jusqu'à Grangent, la Loire est bien jaugée : huit stations jalonnent son cours et la moitié des superficies draînées par les affluents sont également bien connues. De Grangent à Villerest, la situation se dégrade : 18 % de la surface sont explorés. Entre Villerest et Nevers, pour 11.855 km², seul le cours de la Besbre est jaugé, à Saint-Prix (368 km² de bassin versant), puisque la station de Dompierre sur cette rivière à la confluence (756 km²) n'est en service que depuis 1966. Quant au grand bassin de l'Arroux, de 3.300 km² (la même superficie que la Loire à Bas-en-Basset), ses débits ne sont guère connus. La station du Verdier, mise en service en 1961, a publié des débits en 1960 et 1961, 1964, 1965 et 1966 puis elle a dû être abandonnée parce que, trop près du confluent, elle était influencée par les variations du niveau de la nappe phréatique de la Loire, comme le prouvent par exemple les relevés suivants lors de la crue du 11 novembre 1966 qui a affecté le haut cours de la Loire et pas du tout celui de l'Arroux.

novembre 1966	Loire à Digoin (m^3/s)	Arroux au Verdier (m^3/s)
le 6	138	
7	136	9,1
8	130	8,1
9	140	8,4
10	228	12,2
11	500	25,7
12	344	12,9
13	234	9,7
14	182	

Un nouveau site a été choisi à une dizaine de kilomètres en amont : la station de Rigny. Les apports au débit de la Loire de rivières comme l'Aron (1.640 km^2), la Nièvre (650 km^2), l'Acolin (620 km^2) sont inconnus.

Sur l'Allier, les lacunes sont moins graves. Dans presque toutes les régions du bassin, beaucoup d'affluents sont jaugés au moins sur une partie de leur cours. A Pont-du-Guétin, cependant, 60 % des 14.340 km^2 aboutissent à des rivières qui ne sont pas jaugées.

A l'aval du Bec d'Allier, sur une superficie de 3.175 km^2, les débits des affluents intermédiaires sont seulement connus par différence grâce aux stations installées sur la Loire. Cette cause de difficulté n'est pas la seule. Les stations hydrométriques les plus proches de la confluence de l'Allier et de la Loire sont récentes : les relevés de Billy, Pont-du-Guétin, Digoin et Nevers ne remontent pas au delà de 1955. De surcroît, Nevers et Pont-du-Guétin sont des stations médiocres en raison de l'instabilité du lit des deux rivières où, depuis vingt ans, ont été observés des détarages importants qui déprécient les mesures des basses eaux ([25]). En outre, il n'est pas exclu que certains gonflements d'une rivière aient une influence sur les débits de l'autre à cause de la faible pente qui peut faciliter les remous sinon les déversements réciproques ([26]). Pour suppléer

([25]) Ainsi, au Guétin, le lit mineur qui était en rive droite n'est plus utilisé maintenant qu'en hautes eaux.

([26]) C'est l'avis actuel des spécialistes des jaugeages qui utilisent de préférence à ceux du Guétin les relevés de Mornay, une dizaine de kilomètres en amont. Cet avis confirme ceux de lointains prédécesseurs qui se sont déjà intéressés à ce point délicat (SAINJON, lettre du 31 janvier 1859, Archives d'Orléans 30884, et MAZOYER, 1890). MAZOYER, après l'étude spéciale de la crue des 13-15 septembre 1875, par comparaison avec celles des 13-15 octobre 1864, des 13-15 octobre 1868 et 13-15 mai 1872, en conclut que l'Allier dont la crue a précédé la Loire à la confluence « est loin d'avoir exercé sur le maximum de Nevers une influence capitale (sans doute 0 m 15 à 0 m 20). Les crues de l'Allier ne semblent pas influencer d'une manière bien sensible la hauteur des faibles crues à Nevers ». Il est tout de même à noter

à ces lacunes et incertitudes, le recours aux hauteurs d'eau est certes possible mais peu aisé car il faut remonter à Roanne et Vieille-Brioude pour comparer les longues séries des hauteurs d'eau (1846-1961) à celles de Givry-Fourchambault, immédiatement à l'aval du Bec d'Allier.

Contrairement à celles de l'aval, les rivières de l'amont ont été minutieusement explorées. Mais, ici, l'obstacle à des bilans précis réside dans les défauts de la pluviométrie, défauts d'autant plus sensibles que les stations de jaugeage correspondent à des bassins de plus petite taille. Or plusieurs bassins de moins de 100 km² n'ont aucun pluviomètre sur leur territoire. Ce sont les plus élevés, souvent les plus accidentés, et ils correspondent aux tranches d'altitude les plus démunies de postes : entre 1.200 et 1.400 mètres dans le bassin de l'Allier en amont de Vieille-Brioude, entre 800 et 1.200 mètres dans le bassin de la Loire en amont de Bas-en-Basset (figure 2). Il faudrait, au contraire, une plus grande densité et une plus grande finesse dans la connaissance des pluies à mesure que la taille des bassins diminue et que leur altitude augmente.

*
* *

Au terme de cet examen de la double documentation sur les pluies et les débits, plusieurs traits se dégagent :

— Les insuffisances signalées n'empêchent pas une certaine richesse de données par comparaison avec le vide documentaire que rencontrent les hydrologues pour l'étude d'autres bassins en d'autres continents.

— Les données sont récentes, surtout celles des débits, les longues séries des meilleures stations ne remontant jamais au delà de 1919.

— Le fonds de connaissances pluviométriques relativement dense et plus ancien est, trop souvent, lacunaire : outil malgré cela suffisant pour calculer les bilans à l'échelle annuelle ou même mensuelle sur des bassins moyens, mais probablement de faible ressource dans l'étude de maintes crues.

— Enfin, de multiples discordances existent dans plusieurs régions du bassin entre la valeur des relevés relatifs aux pluies et aux débits.

---

qu'une perturbation par remous de 0 m 15 à 0 m 20 est de conséquence. Cependant, les lignes qui suivent montrent bien la complexité de la rencontre des deux ondes au Bec d'Allier. Lors de la même crue de 1875, « le maximum de Nevers a eu lieu en même temps que celui du Bec d'Allier et la crue est restée étale à Nevers pendant près de douze heures. Le maximum à Nevers a eu lieu dix-neuf heures seulement après celui de Digoin où la courbe horaire affecte, au contraire, la forme d'une crue rapide. Enfin, le maximum de Nevers a eu lieu en même temps que celui de Decize alors que, de Digoin et de Decize, les crues mettent à se propager jusqu'à Nevers de trente à trente-cinq heures dans le premier cas, et de quatre à six heures dans le second ».

Les défauts de la documentation, surtout ses discontinuités, mettent en question la valeur représentative des données disponibles. Avec quel degré d'approximation, des moyennes qui portent sur cinq, dix ou quinze ans sont-elles fidèles ? De connaissances bien assurées sur un bassin est-il légitime et prudent d'extrapoler à un bassin voisin à raison de sa proximité ou de certaines ressemblances ? La première question impose une étude sur la variabilité dans le temps des pluies et des débits sur le bassin étudié. Pour répondre à la seconde, il semble utile de rechercher ce qu'on pourrait appeler des bassins témoins : bassins naturels où les informations pluviométriques et hydrométriques permettent de mettre en corrélation, sur la plus longue période possible, les débits et les pluies, et où des connaissances sur d'autres éléments climatiques que l'abondance des précipitations apportent des matériaux grâce auxquels ces corrélations pourraient être interprétées.

CHAPITRE II

LA BRIEVETE DES SERIES D'OBSERVATION ET LE PROBLEME DE LEUR VALEUR REPRESENTATIVE

L'une des difficultés majeures rencontrées dans l'étude de la Loire en amont de Gien est que les longues séries de relevés sont rares. Dans les meilleurs cas, ces séries, pour les pluies comme pour les débits, n'excèdent pas quarante-huit ou cinquante ans. Pour la plupart des bassins, les périodes où modules et pluies annuelles peuvent être comparés s'étendent sur moins de vingt ans et souvent sur beaucoup moins car le parallélisme cohérent des valeurs pluviométriques et hydrométriques est en général accidentel. De telles bases sont insuffisantes pour découvrir des valeurs « normales » (1). Aussi l'examen de la variabilité interannuelle tant des pluies que des débits sur le bassin est-elle un préalable indispensable à tout raisonnement sur le sujet. Quelle conclusion sérieuse pourrait être tirée d'une différence entre les modules ou les pluies moyennes de deux stations, sans connaître le risque d'écarts dus à de simples fluctuations de l'échantillonnage d'années sur lesquelles portent les moyennes calculées ? A quel degré de précision pourront prétendre les évaluations de débits sur les rivières qui ne sont pas dotées de stations de jaugeage quand cette évaluation est fondée sur la connaissance de dix, vingt ou cinquante ans de débits d'une station voisine ? Un coefficient de corré-

(1) En hydrologie, les termes de « normal », « global » et «particulier » appliqués au module ont le sens que leur donne et qu'a défini le professeur PARDE. Les valeurs « normales » sont des moyennes arithmétiques de quarante à cinquante ans et plus. La valeur est d'autant plus « normale » qu'elle s'applique à plus d'années. La valeur est « globale » quand elle s'applique à une série plus courte d'années. La valeur d'une seule année est dite « particulière ». En climatologie, bien que le Congrès International de Varsovie, en 1935, et, plus tard, l'Organisation Météorologique Mondiale aient défini pour des raisons pratiques comme « normales » les moyennes calculées sur une période de trente années, cette période est insuffisante dans de nombreuses régions pour la définition des éléments du climat. Pour Paris, par exemple, une période de vingt-cinq années est trop courte pour représenter convenablement la pluie annuelle ; en revanche, une série de cinquante années consécutives peut donner la « normale » à 5 % de sa valeur réelle, et une série de quatre-vingt-dix années consécutives à 3 % près.

cf. R. ARLERY (1950) et R. ARLERY, H. GRISOLLET, B. GUILMET (1962).

lation entre les pluies et les débits exprime-t-il réellement une liaison nécessaire entre les deux séries de valeur ? Telles sont quelques-unes des questions qui se posent quand il s'agit d'étendre le bénéfice des observations à des bassins inexplorés.

Puis, pour tirer parti de toutes les données relatives à des années récentes d'un certain nombre de stations qui ont aussi l'avantage d'être installées sur des rivières naturelles, il est indispensable de savoir quelle est la valeur représentative de ces années récentes.

I. LA VARIABILITE INTERANNUELLE DES PLUIES ET DES MODULES AJUSTEMENT AUX FREQUENCES OBSERVEES

Il n'est pas question de faire ici une étude complète de la question en recherchant le meilleur ajustement aux différentes lois de probabilité des quelque cent meilleures séries de pluies ou de débits disponibles sur le bassin. Pour d'autres régions, quelques études de ce problème statistique ont déjà été faites. Leurs résultats ne sont pas tous convergents et dépendent, semble-t-il, de la localisation des stations choisies (2). Ce qui importe ici est de vérifier si, dans le bassin de la Loire, les deux lois les plus communément utilisées, celle de GAUSS et celle de GALTON-GIBRAT, sont propres à décrire avec suffisamment d'exactitude les deux phénomènes naturels à rapprocher de manière à fournir un schéma probabiliste de leur variation.

La méthode est appliquée, pour la première fois à notre connaissance, à des lames d'eau moyennes précipitées sur des bassins versants et non pas à des hauteurs d'eau relevées en des points isolés. Pour que pluies et débits soient comparables, ceux-ci (Q) qu'il est d'usage de compter en m^3/s ont été convertis en millimètres (P'), fraction écoulée de la lame d'eau précipitée (P) sur tout le bassin (S) (3).

Il n'y a pas lieu de reprendre l'exposé des notions classiques de statistique descriptive expliquées dans les ouvrages des spécialistes cités et des statisticiens (4).

---

(2) La bibliographie non plus ne prétend pas être exhaustive. Le point de la question a été fait dans les récents ouvrages suivants qui, eux-mêmes, contiennent des références abondantes : ARLERY, GRISOLLET, GUILMET (1962) — G. BEDIOT (1967) et P. BOIS (1968).

(3) La lame d'eau écoulée est déduite du module, débit moyen annuel, par la relation

$$P' = \frac{Q \times \text{nombre de secondes de l'année}}{S}$$

(4) G. BEDIOT (1967), P. BOIS (1968), G. REMENIERAS (1960), M. ROCHE (1963), H. CRAMER (1961), A. LIORZOU (1961).

Les principaux paramètres en l'espèce sont les suivants :

— moyenne arithmétique des pluies ou des débits, $\bar{P}$ ou $\bar{x}$ et $\bar{P}'$ ou $\bar{y}$: quotient de la somme des valeurs particulières x ou y par leur nombre

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x}{n}$$

— moyenne géométrique G, racine $n^{ième}$ du produit de n termes. Le logarithme de la moyenne géométrique étant égal à la moyenne arithmétique des logarithmes de n termes de la série, la moyenne géométrique s'exprime

$$\log G = \frac{1}{n} \Sigma \log x$$

— intervalle de variation ou étendue : différence entre les termes extrêmes de la série

$$W = x \max - x \min$$

— écart absolu moyen, e_a : moyenne des écarts des valeurs particulières à la moyenne

$$e_a = \frac{\Sigma (x - \bar{x})}{n}$$

— écart-type

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma (x - \bar{x})^2}{n}}$$

— erreur type sur la moyenne

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

— coefficient de variation

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

Les figures 7[1-2-3] et 8 présentent les ajustements aux lois de GAUSS et de GALTON-GIBRAT des indices de lames d'eau précipitées et écoulées sur les bassins versants de l'Ance du Nord, de la Borne et du Lignon du Velay, tous trois affluents de la Loire en amont de Bas-en-Basset, et qui couvrent respectivement 354, 430 et 700 km². Les échantillons observés pour l'Ance du Nord et la Borne comportent quarante-cinq valeurs de pluies et quarante-cinq volumes de débits, de 1921 à 1965. Pour le Lignon, le sondage est limité à vingt-cinq ans, de 1929 à 1953.

La première étape de la construction des graphiques a consisté à déterminer la fréquence empirique de dépassement de chaque valeur annuelle par la formule $F = \frac{R}{n+1}$ dans laquelle R est le rang de cette valeur dans l'échantillon classé de n valeurs (ici, quarante-cinq et vingt-cinq).

Puis les points expérimentaux sont portés sur des papiers gradués de sorte que, dans les deux cas, l'ajustement soit une droite. Les graphiques sont ainsi établis en coordonnées gausso-cartésiennes pour l'ajustement à la loi de GAUSS (figure 7^{1-2-3}) et en coordonnées gausso-logarithmiques pour l'ajustement à la loi de GALTON-GIBRAT (figure 8) puisque, dans la distribution de GALTON, c'est le logarithme du caractère qui suit la loi de GAUSS. En abcisses, sont portées les hauteurs d'eau annuellement précipitées (Pmm) ou écoulées (P'mm), en ordonnées, les fréquences ou probabilités au dépassement précédemment déterminées.

Il est à peine nécessaire de dessiner les droites (5) pour constater que, sur tous les graphiques, les points sont à peu près alignés et pour admettre que les distributions empiriques peuvent être assimilées à un modèle théorique dont les propriétés mathématiques sont connues. Pour les bassins étudiés ici, la loi de GAUSS paraît fournir une représentation satisfaisante de la distribution des pluies et des débits.

Cependant, pour les **pluies**, la distribution est peut-être encore mieux ajustée à la droite de GALTON qu'à celle de GAUSS, ce qu'avait déjà vérifié A. COUTAGNE pour le poste de Lyon. Il semble, toutefois, que le fait d'intégrer dans P plusieurs stations (cinq sur le bassin de la Borne, trois sur celui de l'Ance, cinq sur le bassin du Lignon) augmente les possibilités de distribution aléatoire. Sans doute, sur le graphique de la Borne, la distribution des pluies annuelles à la station du Puy ressemble fort à celle des pluies précipitées sur le bassin entier. Mais, pour le bassin du Lignon, le plus hétérogène climatiquement, l'ajustement paraît le meilleur. Pour le bassin de la Loire comme pour le bassin de la Seine, il n'est guère probable que la prédominance de telle ou telle forme d'averses en liaison avec un type de temps particulièrement fréquent vienne contrarier la distribution normale des pluies annuelles (6). Il semble même, pour la région étudiée, que la prudence recommandée par J. RODIER (1964) de

(5) Le tracé de la droite de GAUSS est simple quand on connaît la moyenne de l'échantillon et l'écart-type. Pour la droite de GALTON, le calcul de l'ajustement est beaucoup plus long. Ici, les ajustements de la figure 8 ont été effectués à la main. D'ailleurs, dans son étude sur le bassin Seine-Normandie, G. BEDIOT (1967, pp. 30-31) prouve que les écarts constatés entre les ajustements à la loi de GALTON effectués à la main et par calculs sont relativement faibles.

(6) Il en est autrement des pluies mensuelles et journalières. La distribution courante des valeurs mensuelles est dissymétrique ; celle des valeurs journalières l'est encore plus (ARLERY, GRISOLLET, GUILMET, 1962).

n'admettre, en général, la distribution de GAUSS qu'en deçà de la fréquence décennale, est peut-être excessive. Pour les postes isolés du Bassin Parisien, G. BEDIOT admet une application très valable de cette loi jusqu'à la fréquence 0,05 (une fois tous les vingt ans). Ce dernier seuil de garantie ne pourrait-il même être dépassé dans le cas de lames d'eau moyennes précipitées sur un bassin versant ?

L'appréciation des graphiques de **débits** est plus délicate. A l'examen visuel, l'hypothèse d'une distribution gaussienne est admissible (fig. 7^{1-2-3}). Un test rapide sur l'Ance du Nord, la Borne et le Lignon de la normalité des deux distributions des débits confirme cette hypothèse dans le cas de la Borne mais laisse place au doute dans les cas de l'Ance et du Lignon. On sait que les distributions symétriques les mieux ajustées à une distribution normale de GAUSS doivent se rapprocher des fréquences suivantes :

50 % des valeurs x ou y comprises entre $-\ 2/3\ \sigma$ et $+\ 2/3\ \sigma$
68,26 % des valeurs x ou y comprises entre $-\ \sigma$ et $+\ \sigma$
95,46 % des valeurs x ou y comprises entre $-\ 2\sigma$ et $+\ 2\sigma$

et que e_a (l'écart absolu moyen) doit être à peu près égal aux 4/5 de l'écart-type (tableau n° 7).

Seule une vérification précise de la normalité par le test du χ^2 permettrait d'opter pour l'une ou l'autre loi, encore que l'étude purement statistique doive tenir compte de difficultés qu'il n'y a pas lieu de développer ici (7).

En dépit de l'aplatissement de la courbe symétrique en cloche dans le cas de l'Ance et du Lignon (décelable sur la figure 7^{1-2-3} par les écarts à la droite dans les sinuosités centrales des points), l'hypothèse de la normalité pour les débits et les pluies permet de calculer un ordre de grandeur de l'intervalle de confiance et du coefficient de confiance.

L'échantillon étudié de quarante-cinq ans donne, en effet, une image imparfaite de la « population » totale des précipitations et des débits ou, tout au moins, d'une série de trois à cinq cents ans, qui représenterait mieux la « normale ». L'intervalle de confiance est, en quelque sorte, la marge d'erreur qui risque d'être faite sur l'estimation de la moyenne ou d'une autre valeur cherchée à partir de l'échantillon connu. Cet intervalle est estimé avec un « coefficient de confiance » ou degré de probabilité exprimé en pourcentage. Son calcul fait intervenir l'écart-type et l'erreur type de la moyenne de l'échantillon. Par exemple, pour une probabilité raisonnable de 95 %, la pluie moyenne sur le bassin de

(7) L'une d'elles tient aux variations des distributions des précipitations et des débits annuels suivant le découpage de l'année, année civile ou année hydrologique, dont il sera question au chapitre premier de la deuxième partie, et que l'étude de P. BOIS considère pour les débits.

l'Ance du Nord au cours d'une très longue période aura 95 % de chances d'être comprise entre

$$\bar{x} - 2\,\sigma_{\bar{x}} \quad \text{et} \quad \bar{x} + 2\,\sigma_{\bar{x}}$$

soit 835 mm et 921 mm

$$\left(x = 878 \qquad \sigma = 143 \qquad \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 21{,}4\ (^{8}) \right)$$

Le tableau n° 8 rassemble des expressions quantitatives de la confiance à 95 % et à 50 % pour les pluies et les débits annuels des trois bassins de l'Ance du Nord, de la Borne et du Lignon du Velay, et les pluies aux trois stations pluviométriques de

— Viverols, à 850 mètres d'altitude, au cœur du bassin de l'Ance du Nord dont la pluviosité est homogène,

— Le Puy, à 714 mètres d'altitude, dans le bassin de la Borne,

— Clermont-Ferrand (Les Landais), à 403 mètres d'altitude, dans une situation géographique très différente de celle du Puy, où la hauteur d'eau précipitée est du même ordre de grandeur (645 mm et 637 mm) et où les observations sont beaucoup plus longues.

Dès lors que les distributions sont considérées comme normales, peuvent être ajoutées à ce tableau les valeurs du coefficient de variation $CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$, paramètre utile — parce que valeur relative — pour comparer entre elles les variabilités interannuelles (9). Bien que son interprétation soit très hasardeuse (10), plusieurs remarques peuvent être faites par rapport aux résultats acquis ailleurs (11).

---

(8) Le fait de considérer les séries de quarante-cinq années comme un grand échantillon ($n > 50$) conduit sans doute à une précision un peu excessive. Mais, si l'échantillon était de vingt-cinq années, la différence serait minime, de 2 mm, ce qui n'a pas de sens pour des hauteurs d'eau annuelles précipitées ou écoulées. Pour que l'erreur à craindre sur la moyenne soit inférieure à l'erreur possible sur la mesure de la pluie ($\simeq$ 5 %), le calcul dit que l'échantillon devrait comprendre quarante-deux années.

(9) La variabilité interannuelle peut aussi être décrite très commodément mais avec moins de précision par le rapport des valeurs extrêmes. Enfin, un indice de plus en plus utilisé en hydrologie est le rapport du dernier décile au premier décile des variables rangées dans l'ordre croissant,

$$K = \frac{x \text{ ou } y\ 90\ \%}{x \text{ ou } y\ 10\ \%}$$

Cet indice est moins sujet que le précédent aux erreurs d'échantillonnage puisqu'il exclut les valeurs extrêmes (J. RODIER, 1964).

(10) en particulier parce que les distributions annuelles des pluies et des débits varient suivant le choix de l'année hydrologique. Ainsi, pour le poste de Viverols, il oscille entre 0,170 et 0,195, et, pour le Puy, de 0,150 à 0,202 (M. DACHARRY, 1971).

(11) Outre les ouvrages cités, cf. F. HIRSCH (1966), A. SANSON-CARETTE (1952), P. DINGEN et M. STEYAERT (1971).

1°) Sur la base de longues séries de relevés à trente-cinq stations pluviométriques du Bassin Parisien, le coefficient de variation maximum est de 0,210, le minimum est de 0,179, la moyenne étant de 0,183. Le rapide sondage sur le bassin de la Loire donne des résultats du même ordre de grandeur.

2°) La corrélation généralement alléguée entre la pluie moyenne et le coefficient de variation, à savoir que les coefficients de variation tendraient à être plus grands là où les hauteurs recueillies sont moindres, semble infirmée dans les exemples, rares il est vrai, présentés ici. A l'échelle d'une région aussi finement différenciée que le Massif Central du point de vue du relief et du climat (des types de temps surtout), le paramètre de la hauteur d'eau est certainement conjugué avec les effets de l'altitude et de l'exposition.

3°) Le coefficient de variation des indices pluviométriques moyens sur les bassins de l'Ance du Nord et de la Borne est un peu plus faible que celui des pluies ponctuelles en un poste donné du bassin (Le Puy : CV = 0,150, bassin de la Borne : CV = 0,135 ; Viverols : CV = 0,188, bassin de l'Ance : CV = 0,163).

Incidemment, il est intéressant de rapprocher ce qu'on pourrait appeler le « coefficient de réduction » qui est ici de 0,90 (Borne) et de 0,87 (Ance), déduit de données empiriques, de celui qu'au terme de ses calculs théoriques propose M. ROCHE (1963) dans son exposé sur le problème de « l'abattement » (0,87), c'est-à-dire des conditions d'extrapolation des hauteurs de pluie en un point arbitraire de la surface d'un bassin à la pluie moyenne pour toute l'étendue du bassin. Cette coïncidence qui paraît digne de remarque s'explique sans doute par une pluviosité homogène sur les deux bassins. Dans des circonstances moins favorables, des réserves pourraient être faites sur « l'abattement » calculé par M. ROCHE comme ayant une portée générale.

4°) La variabilité des débits est plus grande que celle des pluies, ce qui suggère que, dans cette région, l'écoulement ne dépend pas seulement de la pluie mais aussi d'autres facteurs qui accentuent l'influence des irrégularités pluviales d'une année à l'autre. P. BOIS (1968) a essayé de mettre en corrélation les valeurs du coefficient de variation des quarante-sept rivières françaises qu'il a étudiées, et, d'abord, la grandeur des bassins versants puis leur débit spécifique ; il n'a obtenu aucun résultat probant et s'est rallié à un classement géographique des rivières. Les coefficients de variation qui oscillent entre 0,11 pour le Doron de Bozel à La Perrière, et 0,42 pour la Creuse à Eguzon, sont, en général, les plus forts pour les rivières issues du Massif Central (intervalle de 0,30 à 0,42) puis pour celles du midi méditerranéen (de 0,24 à 0,36) et les plus faibles pour celles des Pyrénées (0,16 à 0,23) et des Alpes du Nord (0,11 à 0,23).

Ces résultats ont pu surprendre : il est a priori logique de penser que

les coefficients de variation doivent être d'autant plus élevés que le débit spécifique est plus faible. Pourtant les conclusions de P. BOIS semblent confirmées par les valeurs significatives pour le bassin de la Loire. En effet, les coefficients de variation se classent sans corrélation apparente ni avec le débit spécifique ni avec la taille du bassin versant :

	coefficient de variation	*débit spécifique l/s/km²*	*bassin versant km²*
Lignon à PONT-DE-LIGNON	0,43	17,6	700
Allier à VIEILLE-BRIOUDE	0,41	12,7	2.260
Sénouire à PAULHAGUET	0,39	12,1	159
Sioule à PONT-DU-BOUCHET	0,38	14,5	1.170
Loire à BAS-EN-BASSET	0,33	12,5	3.300
Couze Pavin à ST-FLORET	0,32	21,2	219
Dore à GIROUX	0,31	13,4	822
Loire à GIEN	0,31	9,3	35.890
Loire à BLOIS	0,31	9,4	38.180
Coise à MOULIN-BRULE	0,31	8,9	176
Lignon du Forez à RORY	0,30	23,4	115
Ance du Nord à LAPRAT	0,29	12,4	354
Lignon du Velay au CHAMBON	0,29	21,1	147
Borne à CHADRAC	0,28	8,7	430

Ce n'est pas à dire que les deux derniers facteurs (débit spécifique et taille du bassin versant) n'aient pas l'influence logiquement prévue, mais leur influence n'est pas aussi forte que celles, semble-t-il prépondérantes, du climat local et du régime.

Tous ces résultats, sans doute partiels, laissent déjà prévoir la nécessité de faire intervenir dans l'explication des bilans particuliers annuels les facteurs climatiques autres que la quantité de pluie. Ils soulignent aussi la précarité des évaluations des débits dans un régime où les fortes irrégularités d'une année à l'autre sont aggravées par la brièveté des observations.

II. VALEUR REPRESENTATIVE DES ANNEES RECENTES

A. Remarques générales

Le seul examen du tableau n° 2 sur lequel sont reportées, en face de chaque station pluviométrique, plusieurs valeurs « globales » de pluies

correspondant à des groupes d'années divers, fait apparaître, pour certains postes, des fluctuations sensibles entre les différentes valeurs. Au Puy, par exemple, sur six valeurs globales :

679 mm	1881-1949	(Estienne)
635 mm	1931-1960	(Garnier)
622 mm	1936-1965	(E.D.F.)
640 mm	1956-1965	
641 mm	1951-1970	(Garnier),

trois seulement sont comprises dans l'intervalle de confiance à 50 % (tableau n° 8). La moyenne de P. ESTIENNE sort même des limites de probabilité à 95 %, ce qui s'explique car l'échantillon est beaucoup plus grand (soixante-dix ans) que celui précédemment étudié (quarante-sept ans) ([12]).

Les normales de trente ans sont, sauf par hasard, certainement très insuffisantes pour caractériser les pluies et surtout les débits qui oscillent plus fortement encore autour de la moyenne. G. BEDIOT (1967), en comparant aux trente-cinq postes pour lesquels il disposait de longues séries dans le bassin de la Seine, trois « normales » de trente ans ([13]), a décelé à tous les postes des fluctuations sensibles, indépendantes de la valeur annuelle et pouvant s'écarter de 15 % de la valeur moyenne. La « normale » de 1931-1960 offre généralement les moindres écarts.

La compilation par le professeur PARDE d'une multitude de documents se rapportant aux débits de rivières très différentes a mis en évidence que, d'un groupe de dix à vingt ans à un autre, les modules globaux partiels peuvent varier fortement et s'éloigner de 15 à 30 % et quelquefois davantage du module « normal » d'une centaine d'années.

Dès lors, peut-on prétendre utiliser valablement des séries de cinq, huit, dix, quinze ans ? Si le nombre d'années d'observation était réduit, pour le bassin de l'Ance du Nord par exemple, de quarante-cinq à dix, la moyenne annuelle probable des précipitations, à 5 % près, ne serait plus comprise entre 878 ± 43 mm mais entre 878 ± 107 mm. L'intervalle de variation des débits passerait de 392 ± 34 mm à 392 ± 82 mm. Ces résultats semblent condamner tout essai d'utilisation de séries trop courtes.

B. **Les modules**

Néanmoins, il se peut fort bien que le hasard multiplie pendant ces courtes durées, non signifiantes en soi, des pluies ou des modules parti-

([12]) cf. aussi, des différences du même genre relevées par CH. P. PEGUY pour Bourg d'Oisans et Villard de Lans (1969).

([13]) celle d'ANGOT (1851-1900), celle de 1901-1930 non publiée mais calculée par la Météorologie Nationale, celle de Garnier (1931-1960).

culiers très représentatifs des valeurs globales de très longues séries. Il se peut aussi qu'une moyenne de cinq ou six ans masque des excès positifs et négatifs qui se compensent avec équilibre.

Si les vingt dernières années offraient quelque garantie de ce genre pour le bassin étudié, les débits connus depuis moins de vingt ans en près de la moitié des stations de jaugeage du bassin seraient en conséquence valorisés.

La représentativité de cette période contemporaine a été recherchée pour les débits parce que, d'une part, les débits varient plus fortement que les pluies et que, d'autre part, ils résument la combinaison de tous les facteurs d'écoulement autres que la pluie, facteurs qui ont une grande influence comme, par exemple, la température.

Déjà, pour l'ensemble du bassin de la Loire, à la station de Montjean en amont de Nantes, une étude de F. BARRIERE (1969) a démontré que la décennie normalisée ([14]) 1956-1965 était la plus représentative du siècle. Cet indice, déjà précieux, demandait à être vérifié pour la province hydrologique amont du grand bassin où la plus longue période de référence, cinquante ans, est deux fois plus courte qu'à Montjean et dans laquelle les hydraulicités ([15]) risquent d'être très différentes de celles des autres secteurs en raison des variétés climatiques régionales ([16]).

L'examen a porté sur sept stations dont les séries s'étendent sur cinquante ans (1919-1968) :

Vieille-Brioude sur l'Allier	2.260 km²
Pont-du-Bouchet sur la Sioule	1.170 km²
Giroux sur la Dore	822 km²
Chadrac sur la Borne	430 km²
Laprat sur l'Ance du Nord	354 km²
Bas-en-Basset sur la Loire	3.300 km²
Villerest sur la Loire	6.520 km².

Sur cette période, le calcul de toutes les valeurs moyennes des modules de dix années consécutives a donné les résultats qui sont représentés graphiquement à la figure 9.

([14]) c'est-à-dire celle dont le millésime se termine par 0 ou par 5.

([15]) L'hydraulicité est le rapport entre le débit observé au cours d'une année et le module global.

([16]) La configuration et la localisation générale du bassin de la Loire — en gros, un rectangle dont l'axe est orienté NO-SE — est à comparer aux cartes annuelles de zones de pluviosité synchrone en Europe occidentale établies pour cent quatorze années par L. SERRA. Vingt-quatre d'entre elles ont été publiées dans les Mélanges PARDE (1968). Ces zones allongées conservent d'année en année les mêmes dimensions (largeur de l'ordre de 1.200 à 1.500 km) et, surtout, une orientation à peu près constante (NE-SO), perpendiculaire, précisément, à l'axe du bassin de la Loire.

Les courbes, dans l'ensemble, évoluent parallèlement et la concordance est bonne avec la station de Montjean qui, pour comparaison, a été dessinée ici. Mais il est à noter que le parallélisme s'atténue de plus en plus à mesure que les bassins sont plus petits et plus méridionaux.

Pour toutes les stations, les écarts du module moyen des différentes décennies avec le module des cinquante années sont très sensibles.

— Pour l'Allier à Vieille-Brioude, le module moyen de la décennie 1927-1936 dépasse de 29,3 % le module moyen des cinquante années (28,6 m^3/s). Le module le plus faible, 1945-1954, est inférieur de 31 % au module global.

— Dans le cas de la Loire à Bas-en-Basset, selon la plus forte décennie, 1927-1936, la surestimation du module (41,7 m^3/s) est de 31,4 %, et selon la plus faible, 1944-1953, le module est sous-estimé de 27,7 %.

— Les valeurs des décennies extrêmes diffèrent du module de cinquante ans :

à Pont-du-Bouchet,	de	+ 21 %	(1935-1944)
	à	− 26 %	(1942-1951)
à Giroux,	de	+ 22 %	(1923-1932)
	à	− 24,6 %	(1942-1951)
à Villerest,	de	+ 24 %	(1927-1936)
	à	− 22 %	(1941-1950)
à Chadrac,	de	+ 21 %	(1928-1937)
	à	− 15 %	(1947-1956)
à Laprat,	de	+ 18 %	(1927-1936)
	à	− 18 %	(1941-1950)

Dernière remarque : dans la période la plus récente, le module moyen des décennies se rapproche de très près du module moyen de cinquante ans, tout en lui étant légèrement inférieur. Il s'en faut de peu que ce soit aussi le cas de Montjean.

Le classement des décennies en fonction du module, présenté dans le tableau n° 9, retient des écarts toujours inférieurs à 5 % du module global, en plus ou en moins. C'est à peu près l'ordre de grandeur admis également pour la précision des mesures. Les bonnes décennies représentatives sont particulièrement nombreuses dans la période la plus récente. Sans être la meilleure aux sept stations, celle de 1957-1966 vient en première place, avant celles de 1958-1967 et 1956-1965, suivies elles-mêmes par celles de 1959-1968, 1954-1963, 1938-1947 et 1936-1945.

C. Les variations saisonnières

Cependant, la valeur typique du débit moyen annuel ne suffit pas pour qu'une décennie puisse être dite représentative. Il faut encore que,

dans la décennie, l'évolution des débits mensuels soit caractéristique du régime saisonnier. Le calcul, pour les débits mensuels, des moyennes mobiles de dix ans pour toutes les décennies successives permet de découvrir les années ou groupes d'années pour lesquels la corrélation est la meilleure avec la période de cinquante ans d'observation. Les années de 1955 à 1968 sont, par bonheur, l'une de ces périodes, comme le montre à titre d'exemple le tableau n° 10 pour l'Ance du Nord, où sont soulignées les valeurs mensuelles qui s'écartent de moins de 5 % et de moins de 10 % de la valeur globale.

La représentation graphique du coefficient mensuel de débit ([17]) pour la décennie où, en chaque station, les évolutions de ce coefficient suivent le mieux le régime « global » confirme que la période récente est, dans l'ensemble, représentative (figure 10). La décennie de 1956-1965 est celle dont la courbe suit le mieux celle du régime « global » aux stations de Pont-du-Bouchet, Vieille-Brioude, Laprat et Chadrac, stations pour lesquelles les modules de la décennie n'étaient pourtant pas les meilleurs. A Bas-en-Basset, à Villerest et à Giroux, les décennies 1957-1966 et 1958-1967 sont, en revanche, plus représentatives du régime. Même à Vieille-Brioude, en raison de la meilleure répartition des écarts sur les différents mois, la suite des années 1957-1966 est aussi bonne que 1956-1965.

Il apparaît aussi que les corrélations sont les plus satisfaisantes dans le bassin de l'Allier et de ses affluents. La station de Pont-du-Bouchet, par exemple, a huit mois d'écarts inférieurs à 10 % et quatre mois d'écarts inférieurs à 20 %.

Enfin, pour toutes les stations sauf une (Laprat), ce sont les écarts de saison chaude, de mai à octobre, qui compromettent le plus la corrélation. La hauteur des basses eaux d'été est sensiblement supérieure à la valeur « globale » ([18]).

D. Les situations extrêmes

Un reproche majeur, en effet, qui peut être adressé aux années les plus récentes est de n'être pas du tout représentatives des étiages qui restent une des plus fortes singularités de la Loire. La pénurie exceptionnelle d'août 1949, la plus grave que la Loire moyenne ait probablement connue depuis un siècle, peut être prise comme référence. Le lit de la Loire à Orléans était alors apparemment sec et le débit, effective-

([17]) Le coefficient mensuel de débit est le rapport du débit moyen mensuel au module.

([18]) C'est aussi un caractère de la période à Montjean où, pour la décennie 1956-1965, la plus représentative à cette station, le débit caractéristique d'étiage (D.C.E.) est nettement supérieur à celui de la période de référence de cent années, avec un écart de 26 %.

ment mesuré en deux jaugeages, était d'environ 11 m^3/s à Gien [19]. A Villerest, pendant quarante-sept jours consécutifs, en juillet et août, le débit moyen journalier fut inférieur au débit caractéristique d'étiage de la période 1920-1968 (3,90 m^3/s), le débit journalier le plus faible étant descendu à 1,3 m^3/s [20]. Le tableau n° 11 où sont reportés les débits moyens journaliers minimum de chaque année à Villerest et à Gien montre très clairement l'abondance relative des basses eaux de la Loire supérieure depuis vingt ans. S'il est tenu compte qu'en 1959, le débit de Villerest (3,75 m^3/s) n'a été légèrement inférieur au D.C.E. moyen (3,90 m^3/s) qu'un seul jour, seuls les étés de 1961, 1962 et 1964, dans les décennies qui ont été reconnues comme représentatives du régime moyen, peuvent être considérés comme plutôt secs.

C'est à croire que la Loire se refuse à livrer son secret sur les pertes d'une partie de ses eaux alors que, chaque été depuis dix ans, les équipes de jaugeurs de la Circonscription Electrique Centre et Ouest et des Ponts et Chaussées, poursuivant leur campagne de jaugeages d'étiage inaugurée en 1961, attendent les très bas débits dont ils espèrent les lumières supplémentaires sur les cheminements des eaux du fleuve entre le Bec d'Allier et le Bec du Cher.

Tandis que les riverains s'en réjouissent, sied-il de se lamenter sur le calme relatif de l'hydrologie ligérienne ? Les gonflements de la Loire ont été si modestes au cours des quinze dernières années que la qualité de crues peut à peine leur être appliquée si l'on s'en tient à la définition classique et générale des crues qui sont les « épisodes dramatiques, exceptionnels » de l'hydrologie d'un fleuve (PARDE, 1933). C'est à peine si, du Bec d'Allier à Gien, les berges ont été submergées. La cote de 3 mètres au-dessus de l'étiage à Nevers, celles de 3 m - 3 m 50 du Bec d'Allier à Gien sont considérées comme l'état critique du fleuve, celui où il y aurait submersion du Val sans les levées, et où ingénieurs et riverains estiment que l'inondation commence. Les débits correspondant à ces hauteurs sont de 1.400 à 1.800 m^3/s en amont de Gien. Or le débit moyen journalier n'a dépassé 2.000 m^3/s à Gien, en quinze années, que deux fois en 1968.

Le tableau suivant sur lequel ont été notées toutes les intumescences

---

[19] Les débits d'étiage de 1870 et 1921, les plus sérieux avant 1949, sont évalués pour Gien à environ 15 m^3/s.

cf. Les évaluations de M. PARDE, et de PELLECUER et BARRIERE (1963).

[20] Le débit caractéristique d'étiage (D.C.E. ou D.C. 355) est celui qui a été dépassé pendant 355 jours de l'année comme le D.C. 10 ou D.C. max. est celui qui a été dépassé pendant dix jours de l'année, le D.C. 1 celui qui a été dépassé pendant un mois c'est-à-dire trente jours, le D.C. 2 ou soixante jours celui qui a été dépassé pendant deux mois ou soixante jours etc., ces jours étant consécutifs ou non. Il faut se rappeler que les débits caractéristiques moyens ne sont pas obtenus en faisant la moyenne des D.C. de chaque année mais par le classement de tous les débits journaliers de la période.

qui, pour la rivière, ont dépassé 1.000 m³/s à Gien de 1939 à 1969 met en relief cette particulière médiocrité des hautes eaux de la Loire au cours des années récentes.

Crues dont le débit moyen journalier maximum est, à Gien, de	*1939-1954 (16 années)*	*1955-1969 (15 années)*
plus de 3.000 m³/s	4	0
de 2.000 à 3.000 m³/s	12	2
de 1.000 à 2.000 m³/s	39	39

Les intumescences du printemps et de l'automne 1958 (débit moyen journalier : 1.150 m³/s et 1.500 m³/s à Gien), de février 1961 (1.850 m³/s), de janvier 1962 (1.600 m³/s), des printemps 1963 (1.380 m³/s) et 1964 (1.210 m³/s), d'octobre 1965 (1.375 m³/s) et de janvier 1968 (2.110 m³/s) n'ont rien d'exceptionnel. La crue la plus forte a été celle de décembre 1968 où le débit maximum instantané a atteint 2.810 m³/s à Gien (débit moyen journalier, le 30 décembre : 2.660 m³/s) et qui faillit mettre en déroute le somnolent Service d'Annonce des Crues d'Orléans qui avait perdu l'habitude d'utiliser les réglettes BACHET pour des cotes de cet ordre....

Ces montées, même les plus fortes, paraissent dérisoires à côté des événements monstrueux de 1846, 1856, 1866 au cours desquels il y aurait eu respectivement, suivant les estimations de SAINJON, de 8.500 à 9.800, de 8.800 à 9.300 m³/s au Bec d'Allier, la cote ayant atteint à Gien 7 m 19 en juin 1856. Il est vrai que, depuis ces crues catastrophiques, le niveau le plus élevé à Gien a atteint seulement 5 m 73 en octobre 1907 et que, depuis quarante-trois ans, après avoir coté 5 m 10 en mars 1923, la Loire n'a pas dépassé à cette station la cote de 5 mètres qui met en alerte les riverains d'aval.

En revanche, cette période de 1955 à 1970, trop réduite pour une étude sur la fréquence des crues à Gien, a l'avantage de comporter plusieurs événements locaux remarquables bien qu'ils aient été sans grande conséquence sur le collecteur principal après le Bec d'Allier. C'est la crue du Lignon du Velay, par exemple, le 12 août 1963 : en moins de deux heures, les eaux montèrent de 1 mètre à 3 m 58 au Chambon-sur-Lignon, surprenant de nombreux campeurs, et le débit spécifique maximum y fut évalué à 2.000 l/s/km². La crue des 6 et 7 novembre 1963 qui s'est atténuée rapidement au delà de Villerest et de Vieille-Brioude et n'a donné à Gien qu'un débit journalier maximum de 1.020 m³/s fut très forte sur la haute Loire et sur l'Allier. La crue de novembre 1968 sur l'Allier atteignit 5 mètres à l'échelle de Vieille-Brioude, se classant ainsi immédiatement après celle d'octobre 1907 au cours de laquelle les eaux

étaient montées à 5 m 80. Cela reste tout de même modeste par comparaison aux cotes de 9 mètres à 9 m 50 atteintes en 1866.

Telle qu'elle est, malgré ses insuffisances et ses courtes séries, la documentation contemporaine sur les pluies et les débits, jointe à celle des périodes antérieures quand elle existe, peut donc être très utile. Elle peut être, de plus, valorisée, par l'apport souvent récent lui aussi d'informations sur les situations météorologiques en altitude, les types de temps, sur l'évapotranspiration, le relief et la nature du sol. C'est ce qui va être vérifié dans le cadre de plusieurs bassins élémentaires.

CHAPITRE III

QUELQUES JALONS DANS L'ENSEMBLE LIGERIEN : LES BASSINS ELEMENTAIRES

Les services que peut rendre l'analyse hydrologique de bassins élémentaires composant le grand ensemble drainé par la Loire ont déjà été suggérés : découverte des évolutions de l'eau des pluies vers celle des débits là où les conditions au sol de l'écoulement seront connues ; comparaisons entre des rivières « témoins » aménagées et celles qui ne le sont pas ; explication de tout ce qui concourt à composer le débit et le régime de la Loire à Gien.

En l'espèce, ces bassins élémentaires pourront être « représentatifs » s'ils sont propres à rendre compte des espaces plus grands qu'eux dont ils ont le type morphologique et climatique. Le plus souvent, ils ne seront que des bassins « témoins », des « repères » originaux dont trois critères ont imposé le choix.

Le premier est qu'ils soient naturels : en cinquante-six sur soixante-seize stations de jaugeage, les débits remplissent cette condition. Le second critère requiert une durée assez longue d'observations, au moins une « décennie représentative » du comportement moyen de la rivière étudiée. Douze stations, cependant bien réparties sur les bassins, sont ainsi écartées, mais non pas entièrement éliminées dans la mesure où leurs débits très récents seront utilisés comme références indicatives ou de contrôle dans l'étude des bilans ou des crues (1). Ce second tri fait éliminer les stations de

— Les Gauds (34 km²) et Le Crouzet (128 km²) sur la Semène, seul affluent jaugé de la Loire entre Bas-en-Basset et Grangent ;

— Sauvain (22 km²) sur le ru de Pierre-Brune, affluent du Lignon du Forez ;

— Moulin-Neuf (70 km²) sur la Dolore dans le Livradois ;

(1) Les trop récentes stations de Dompierre sur la Besbre, de Feurs sur le Lignon du Forez, de Laborie sur la Loire, de Jumeaux sur l'Allier, de Saint-Pourçain sur la Sioule ont, en plus, le défaut d'être installées sur des rivières influencées.

— Le Salet (75 km²) sur le Couzon qui dévale des pentes nord-occidentales du massif du Forez ;

— Prades (1.324 km²) sur l'Allier ;

— Murat (20 km²) et Lempdes (995 km²) sur l'Alagnon, issu du Cantal ;

— Chareil-Cintrat (555 km²) sur la Bouble ;

— Vitry-en-Charolais (883 km²) sur la Bourbince ;

— Le Verdier (3.300 km²) puis Rigny-sur-l'Arroux (2.380 km²), le seul jaugé des affluents de la Loire originaires du Morvan.

Le troisième critère est le plus contraignant. Il impose pour une période commune assez longue une égale connaissance des débits et des pluies sur le bassin. Or le calcul de l'apport pluvial sur une surface réceptrice est une opération délicate qui a pu être faite avec assez de garantie pour vingt et un bassins seulement. Cette sévère élimination appelle quelques explications.

I. EVALUATION DU VOLUME D'EAU PRECIPITEE SUR UN BASSIN VERSANT

En supposant que les mesures de la pluie et de la neige soient exactes et continues pour tous les pluviomètres et pluviographes d'un bassin, il reste à estimer, d'après ces connaissances ponctuelles de la hauteur d'eau tombée, l'épaisseur de la lame d'eau précipitée sur l'entier bassin. Les trois méthodes utilisées supposent que la pluie en un point est représentative des pluies tombées sur une zone plus ou moins étendue autour de ce point. La pondération par planimétrage des surfaces incluses entre les isohyètes préalablement tracées est de loin la plus rationnelle : elle permet, grâce à une bonne connaissance géographique de la région, surtout si le terrain est accidenté, de rectifier les lignes qui seraient construites en tenant compte simplement de la distance qui sépare deux points. Mais la méthode est d'une application laborieuse car il faut, pour chaque averse ou chaque mois ou chaque année, dessiner les isohyètes et planimétrer les surfaces partielles composant la superficie totale du bassin. Aussi la facilité de calcul de la moyenne arithmétique des précipitations relevées aux diverses stations du bassin et admise comme hauteur moyenne des précipitations sur l'ensemble du bassin conduit-elle souvent à choisir cette seconde méthode d'autant plus arbitraire que les pluviomètres sont plus éloignés les uns des autres, inégalement répartis et plus dispersés sur un territoire montagneux.

La méthode pondérée dite de Thiessen est une amélioration de la précédente car elle tient compte des distances variées qui séparent les différents pluviomètres. Une construction géométrique simple permet de calculer, une fois pour toutes, la fraction du bassin attribuée à chaque station et, pour chaque évaluation de pluie moyenne (P), le bassin (S)

est décomposé en surfaces partielles (s) qui sont supposées recevoir la pluie (p) enregistrée au pluviomètre qui en est le centre :

$$P \text{ égale alors } \frac{\Sigma\, p \,.\, s}{S}.$$

Par les trois procédés, l'évaluation est approximative et la meilleure méthode, celle des isohyètes, trouve ses limites dans le cas de trop petits bassins, dépourvus ou mal pourvus de pluviomètres où le dessin des courbes ne peut correspondre au mieux qu'à ce qui est vraisemblable, non à ce qui est observé. Or plus la taille des bassins diminue, plus la comparaison des pluies et des débits exige de finesse dans l'observation pluviométrique.

Cette incertitude dans la connaisance des pluies est la cause d'exclusion de dix-huit stations aux débits bien connus.

Sur les vingt et un bassins qui ont satisfait à ce premier examen critique, les possibilités d'application des méthodes les plus rapides ont été étudiées par comparaison avec celle du dessin d'isohyètes. Les résultats particuliers concernant chaque bassin ont été portés sur la fiche le concernant (tome II). Sur la base de l'ensemble des fiches établies par bassin, les remarques d'ordre général suivantes peuvent être faites.

Quand trois à six pluviomètres sont assez également répartis sur un bassin de 200 à 600 km², on peut s'attendre que la méthode de Thiessen n'apporte pas de résultats sensiblement meilleurs que celle de la moyenne arithmétique. Ainsi, sur le bassin de l'Ance du nord, en amont de la station-usine de Laprat (354 km²), une assez bonne répartition des trois pluviomètres les plus anciens de Saint-Anthême (950 m), Viverols (850 m) et Passouira (700 m) permet de retenir, avec une approximation satisfaisante, la moyenne arithmétique de leurs précipitations comme indice pluviométrique du bassin. Le calcul de la moyenne pondérée, par la méthode de Thiessen, depuis l'implantation du nouveau pluviomètre de St. Pal de Chalençon et la prise en compte de deux autres pluviomètres proches (Chomelix et Valcivières) a donné des résultats très voisins des moyennes arithmétiques. Pour chaque année, de 1935 à 1965, les écarts entre les valeurs obtenues par les deux méthodes ont toujours été inférieurs à 5 % et les moyennes générales de cette période de trente ans ont été respectivement de 880 mm par la moyenne arithmétique et de 889 mm par la moyenne pondérée de Thiessen. Sur les moyennes globales plus courtes, les deux valeurs s'éloignent davantage l'une de l'autre, la moyenne arithmétique étant toujours inférieure à la valeur Thiessen. Cette dernière est, pour ce bassin de l'Ance du Nord, plus proche des résultats planimétrés. Il semble donc que la moyenne arithmétique soit le plus souvent, dans ce cas, inférieure à la réalité de 3 à 5 %. La figure 11 montre que la supériorité de la moyenne Thiessen sur la moyenne arithmétique se vérifie dans l'ensemble pour les valeurs annuelles particulières ; chacune de ces valeurs étant représentée par un point

dont l'ordonnée est égale à la moyenne arithmétique et l'abcisse à la moyenne pondérée de Thiessen, la majorité des points se trouve à gauche de la bissectrice correspondant aux valeurs égales des deux indices (2). Cependant, l'écart pour les années particulières n'est pas toujours dans le même sens : la moyenne arithmétique est parfois supérieure à l'autre, ce qui empêche d'appliquer automatiquement la même correction à la moyenne arithmétique pour la rendre plus fidèle à la réalité. Les types de temps qui ont dominé telle ou telle année, accompagnés de pluies diversement localisées, sont à l'origine de ces fluctuations dans l'un ou l'autre sens. Les pluies ne sont, en effet, jamais réparties également sur tout le bassin et plus le bassin est étendu, plus les disparités entre ses secteurs partiels s'accentuent.

Dans le cas d'épisodes pluvieux concrets, le fait est encore mieux vérifié que pour les moyennes annuelles. Les points se dispersent davantage de part et d'autre de la bissectrice sur les graphiques de la figure 12 relatifs à une centaine d'averses particulières recensées sur les bassins de la Seuge (115 km²), du Chapeauroux (389 km²) et de l'Allier à Lavalette (384 km²) entre 1958 et 1965 (3). Or, dans chacun des bassins, à toutes les averses associées à un même type de temps correspond un même schéma de répartition de la pluie, qui explique la supériorité de la moyenne calculée par l'une des deux méthodes, au point que la comparaison des deux résultats pour la même averse permet de déterminer assez précisément le type de temps auquel correspond cette averse.

La méthode des isohyètes étant très généralement la meilleure, le choix entre l'une des deux autres méthodes ne saurait être fixé a priori. Pour chaque bassin, surtout en région montagneuse dont les conditions topographiques et d'exposition aux vents pluvieux sont très variées, il faudra recommencer les comparaisons et évaluations minutieuses en vue de découvrir la meilleure des deux méthodes. Plus les hétérogénéités climatiques sont nombreuses, plus la détermination de la lame d'eau moyenne est délicate. Quand les meilleures conditions d'évaluation sont réunies, les écarts, pour les épisodes pluvieux, entre la valeur obtenue par dessin d'isohyètes, d'une part, et les deux autres méthodes, d'autre part, sont, en moyenne, d'environ 10 % en plus ou en moins de la valeur obtenue par dessin d'isohyètes. Les résultats inscrits dans le tableau n° 12 montrent en outre que la méthode de Thiessen apporte,

(2) Dans le cas du Lignon, au contraire, les points se trouvent presque tous à droite de la bissectrice : la moyenne arithmétique donne des valeurs supérieures à celles de la moyenne pondérée de Thiessen. On ne peut conclure de la règle dans un bassin à la même règle dans un autre. Cela s'explique par les particularités de chaque bassin quant à l'emplacement des pluviomètres, à l'exposition aux vents humides et au régime pluvial.

(3) Les figures 11 et 12 peuvent être comparées à condition de tenir compte de la différence des échelles.

dans cinq cas sur sept, une légère amélioration de la moyenne arithmétique.

Pour les surfaces réceptrices qui dépassent un millier de kilomètres carrés, les calculs sont si longs et si compliqués que le choix de quelques stations témoins s'impose pour déterminer les précipitations moyennes de chaque année sur l'ensemble du domaine fluvial. Pour les trois bassins de la Sioule à Pont-du-Bouchet (1.170 km²), de l'Allier à Vieille-Brioude (2.260 km²) et de la Loire à Bas-en-Basset (3.300 km²), les plus grands des vingt et un bassins, l'analyse conduit aux conclusions suivantes.

Sur le *bassin de la Sioule,* parmi les sept postes pluviométriques en service (4), celui de Gelles est très représentatif, comme le montrent les résultats comparés du tableau n° 13. En face des valeurs obtenues par planimétrage, figurent les hauteurs d'eau recueillies à Gelles et la moyenne arithmétique des hauteurs aux trois postes les plus anciens, Gelles, Pontaumur et Montel-de-Gelat. Cette moyenne, majorée de 10 %, donne la meilleure image du régime pluviométrique sur le bassin.

En raison de la longueur des séries de débits disponibles, la station fondamentale de *Vieille-Brioude sur l'Allier,* a été retenue bien que la rivière soit très légèrement influencée par le barrage d'Alleyras-Poutès (5). Malencontreusement l'équipement pluviométrique en amont de cette station y est récent et les postes sont concentrés à l'amont. Les 950 premiers km², soit 42 % du bassin, ont dix-sept pluviomètres sur vingt-quatre. Parmi les plus anciens postes, ceux de Châteauneuf-de-Randon, à 1.280 mètres, Fix Saint-Geneys, à 1.112 mètres, et Saugues, à 960 mètres, donnent en moyenne des hauteurs d'eau qui, pour les années ou groupes d'années pour lesquelles les isohyètes ont été dessinées, ne sont que légèrement inférieures aux valeurs ainsi évaluées.

Ces trois postes sont même plus représentatifs (moyenne A dans le tableau n° 14) que ceux qui ont été choisis pour figurer en référence sur l'annuaire hydrologique de la France (moyenne B, sur le même tableau) (6).

Pour des bassins plus grands que celui de Vieille-Brioude, la seule méthode applicable avec assez de garantie au calcul de l'apport pluvial moyen est celle des isohyètes. Pour cette raison, trois stations de jaugeage le long de l'Allier, à peine influencées par les barrages d'Alleyras-Poutès sur l'Allier et de Sauviat sur la Dore, Jumeaux (2.983 km²), Vic-Le-Comte (5.380 km²) et Billy (9.000 km²), n'ont pu être retenues comme limites aval de bassins témoins.

---

(4) Les données sont continues à partir de 1920 pour Gelles, 1927 pour Pontaumur, 1935 pour Montel-de-Gelat, 1948 pour Ceyssat et 1949 pour Pontgibaud, Herment et Rochefort-Montagne.

(5) La capacité relative de la réserve d'Alleyras est de 0,004 seulement (à comparer aux autres aménagements cités au tableau n° 5).

(6) Sur l'annuaire de 1959 : Châteauneuf-de-Randon (1.280 m), Bouchet St. Nicolas (1.228 m), La Bastide-Masméjean (1.043 m), Pinols (1.018 m).

Le *bassin de la Loire en amont de Bas-en-Basset* est un cas particulier. Sa grande taille, 3.300 km², et les aménagements de Montpezat devraient le faire écarter du recensement. Mais, d'une part, sur sa surface pourtant énorme et équipée d'une quarantaine de pluviomètres, la mesure de l'apport pluvial a donné les moyennes à la fois les plus proches des valeurs annuelles planimétrées (écart de 3,5 % en moyenne) et les plus fidèles pour décrire le régime saisonnier des pluies grâce à la pondération suivante : moyenne arithmétique des lames d'eau sur les bassins de l'Ance du Nord, de la Borne, du Lignon du Velay et aux pluviomètres du Mézenc et de Pont-de-Lignon. D'autre part, malgré les prélèvements de Montpezat, le bassin peut être considéré comme naturel *1°)* parce que les relevés qui y ont été faits de 1919 à 1954, soit pendant trente-cinq ans, sont ceux de débits naturels, *2°)* parce que aucun prélèvement au profit de l'usine de Montpezat n'est fait pendant les mois d'été et que le régime reste alors naturel, *3°)* parce que, même pendant la période où les débits sont influencés, les détournements sont exactement connus et, sous certaines réserves, les débits naturels peuvent être reconstitués.

II. LES PRINCIPAUX CARACTERES DES BASSINS TEMOINS

Pour chacun des vingt et un bassins « naturels », ni trop petits (minimum 51 km² : le Vernazon, au Crouzet) ni trop grands en vue d'une estimation passable de la pluie moyenne (maximum 3.300 km² : la Loire, à Bas-en-Basset), quelques traits morphologiques, pluviométriques et hydrologiques ont été réunis sur une fiche. Les renseignements ainsi rassemblés ne prétendent aucunement décrire complètement tous les facteurs de l'écoulement qu'impliquerait une étude monographique. C'est un inventaire simple et de consultation aisée des faits essentiels qui permettent de différencier et de comparer les bassins avec une fidélité suffisante (cf. cartes et fiches tome II).

LISTE DES BASSINS TEMOINS

Rivière	*Station de jaugeage*
Alagnon	JOURSAC-LE-VIALARD
Allier	LAVALETTE
Allier	ALLEYRAS-POUTES
Allier	VIEILLE-BRIOUDE
Ance du Nord	LAPRAT
Besbre	MAYET-DE-MONTAGNE
Borne	CHADRAC
Chapeauroux	CHAPEAUROUX

Rivière	*Station de jaugeage*
Couze de Chambon	CHAMPEIX
Couze de Pavin	SAINT-FLORET
Dore	GIROUX
Gazeille	LE MONASTIER
Langouyrou	LANGOGNE
Lignon du Forez	RORY
Lignon du Velay	PONT-DE-LIGNON
Loire	RIEUTORD
Loire	BAS-EN-BASSET
Sénouire	PAULHAGUET
Seuge	SAUGUES
Sioule	PONT-DU-BOUCHET
Vernazon	LE CROUZET

A. Les divers paramètres

Dans les caractéristiques morphologiques, l'*altitude* est première parce qu'elle a des conséquences capitales en hydrologie. L'abondance des précipitations, la proportion des chutes d'eau nivales par rapport aux pluies, la température et, par conséquent, l'évapotranspiration dépendent toutes d'elle dans une large mesure. La valeur de la dénivellation entre les altitudes extrêmes conduit à la notion de pente quand elle est rapportée à une distance.

Au pourcentage de pente moyenne du bassin ou à un indice de pente tel que celui défini par M. ROCHE (1963), par exemple, à partir de la notion de « rectangle équivalent », qui restent l'un et l'autre très abstraits (7), ont été préférés les *diagrammes de fréquences altimétriques* et les *profils hypsométriques des bassins,* sur lesquels se lisent facilement

(7) Le calcul de la pente moyenne est, d'autre part, très incertain car il fait intervenir la longueur totale des courbes de niveaux L tracées de façon à garder entre elles une dénivellation D. Sa formule est $\frac{D\,L}{S}$, S étant la superficie du bassin versant. En raison des différences de taille des bassins versants, la même échelle n'aurait pu être adoptée pour mesurer les courbes des niveaux. Le 1/200.000ème n'est pas assez précis pour les petits bassins, le 1/100.000ème est encore une échelle trop petite et le 1/50.000ème ne couvre pas complètement le Massif Central. Or la longueur des courbes dépend du degré de « généralisation » cartographique, différent suivant les échelles et les dessinateurs. Dans ces conditions, l'indice de pente moyenne est incomparable d'un bassin à l'autre et n'a plus beaucoup de sens.

les altitudes et les pentes moyennes caractéristiques et qui ont l'avantage d'être directement comparables. Pour le bassin du Chapeauroux, par exemple, le profil décrit bien les hauts plateaux aux formes mûres situés au pied de l'escarpement de la Margeride et du Palais du Roi et au-dessus de la gorge de raccordement où les eaux du Chapeauroux se précipitent vers l'Allier. Sur le profil de la Seuge, limité à la partie du bassin en amont de la station de Saugues à 927 mètres, la gorge de raccordement n'est évidemment pas figurée.

La *forme* générale de chaque bassin, dont dépend, à pente égale et pour des pluies assez semblables, le temps de concentration des eaux, est caractérisée par l'indice de compacité de Gravelius Kc, rapport du périmètre du bassin (P en kilomètres) à celui d'un cercle de même superficie (S = superficie du bassin en kilomètres carrés) (8) :

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} \simeq 0{,}28 \quad \frac{P}{\sqrt{S}} .$$

Un indice Kc proche de 1 traduit en principe une forme ramassée favorable à une concentration rapide du ruissellement. A l'inverse, plus Kc est fort, plus il devrait indiquer un étalement du flot sur l'émissaire principal. Certes, comme tous les indices, celui-ci n'exprime qu'imparfaitement des réalités très originales et toutes singulières. Le bassin de l'Ance du Nord par exemple, de forme allongée, a le même indice que celui du Lignon du Velay dont la forme est un triangle isocèle de faible hauteur dont le sommet coïncide avec la station de jaugeage. Il est sûr que la concentration des eaux se fait très différemment sur les deux bassins puisque, sur l'un, une seule artère, l'Ance, forme l'épine dorsale du bassin et que, sur l'autre bassin, deux artères confluent à peu de distance de la station de jaugeage.

Enfin, les types de *roches* constituant le substratum ont été notés.

Au point de vue pluviométrique, outre les quelques résultats d'études comparées entre les différentes méthodes d'évaluation de la pluie moyenne sur le bassin, la fiche renseigne essentiellement sur la répartition des précipitations au cours des mois de l'année, soit sur l'ensemble du bassin, soit à la station la plus représentative si le bassin est homogène, soit en plusieurs postes pluviométriques s'il ne l'est pas. La période globale prise comme référence n'est pas toujours la plus longue disponible ; elle groupe de préférence les années pour lesquelles les débits sont connus sur le bassin.

(8) Ici encore, le degré de généralisation du contour du bassin est une source d'imprécision mais c'est le même contour qui est utilisé pour mesurer le périmètre et pour planimétrer la superficie. L'indice « d'allongement » de M. CAQUOT, rapport du plus long parcours de l'eau au côté du carré de surface équivalente, donne des résultats comparables.

A l'échelle du bassin étudié, l'*indicatif saisonnier* défini par R. MUSSET (1935) est trop approximatif (9). Le coefficient mensuel relatif de A. ANGOT, qui exprime le caractère plus ou moins pluvieux de chaque mois dans l'ensemble de l'année, se prête à des comparaisons plus précises entre les apports pluviaux sur différents bassins mais son expression cartographique pour traduire à première vue le caractère propre de chaque mois ou de chaque saison n'est guère possible à cette échelle (10). La courbe des valeurs moyennes lui a été préférée. L'indice de concentration saisonnière des précipitations de CH. P. PEGUY (1961), sans remplacer les précédents, a, sur eux, l'avantage d'isoler les trois mois consécutifs dont la somme des hauteurs d'eau moyenne est la plus forte indépendamment de toute définition a priori d'une saison. Il est le rapport du total le plus élevé, en trois mois consécutifs, au tiers des précipitations tombant pendant les neuf autres mois de l'année. Il est d'autant plus élevé que les précipitations tendent à se concentrer sur une plus brève période. L'exemple de cet indice calculé sur les moyennes de 1936-1965 aux cinq postes du bassin du Lignon vellave, et comparé à l'indicatif de MUSSET montre les nuances entre les deux présentations de la saison d'abondance pluviale et l'intérêt d'utiliser celle de CH. P. PEGUY (tableau n° 15).

TABLEAU N° 15

REPARTITION DES PRECIPITATIONS DANS L'ANNEE (1936-1965) SUR LE BASSIN DU LIGNON DU VELAY

(1) *initiales des mois*
(2) *initiales des saisons*

Postes	*Indicatif saisonnier de MUSSET*	*Indicatif de concentration saisonnière de PEGUY*	*Trimestre de concentration* (1)	*Emplacement saisonnier du trimestre* (2)
Pont-du-Lignon	P E A H	1,46	m J j	P e
Pont-de-Faurie	P E A H	1,17	a S o	E a
Tence	P E A H	1,30	a S o	E a
Fay-sur-Lignon	A P H E	1,28	O n d	A
Mézenc	A P E H	1,39	s O n	e A

(9) Il s'exprime par les quatre initiales des saisons (ou plutôt des quatre trimestres) dans l'ordre de pluviosité décroissante.

(10) Le coefficient pluviométrique relatif est le rapport des précipitations moyennes réelles de chaque mois à ce que ce mois recevrait, compte tenu de sa durée, si le total des précipitations annuelles était également réparti tout au long de l'année.

Etant donné l'influence considérable qu'exercent sur l'écoulement les répartitions mensuelles des pluies, l'analyse pluviométrique a aussi distingué deux périodes dans l'année : entre le 1er décembre et le 31 mai, d'une part, entre le 1er juin et le 30 novembre, d'autre part. Cette coupure, peu habituelle en hydrologie [11], est fondée sur plusieurs observations concrètes. Tout d'abord, le rôle de la neige semble déterminant dans le Massif Central à partir du mois de décembre seulement et les chutes de neige sont fréquentes encore au mois de mai [12]. Certes, il peut neiger bien avant décembre mais la couche neigeuse, vite entraînée par les pluies qui suivent, ne se maintient pas au sol. En règle, la neige ne fait pas partie du paysage avant Noël. En revanche, « pas de coin de la montagne où ne puissent se produire en mai des chutes parfois importantes », écrit P. ESTIENNE. « .... Vers 1.000 mètres, elles deviennent rares dans le sud de la Margeride et du Velay ; cependant, leur fréquence augmente vite avec l'altitude puisqu'en trente-sept ans, l'observatoire de l'Aigoual n'a ignoré la neige que quatre fois... Au Mézenc, le mois de mai n'est jamais exempt de neige et il arrive, comme en 1938, qu'il en tombe plus qu'en aucun autre mois de l'année ; au Puy-de-Dôme, il neige également en mai à peu près tous les ans et la neige peut persister au sol pendant quelques jours. Plus bas, jusque vers 1.000 mètres, les chutes deviennent plus rares et surtout moins abondantes : sur le plateau de la Chaise-Dieu, pourtant médiocrement élevé, il neige encore néanmoins un an sur deux en mai.... ; dans l'ouest du Massif, il semble que ces chutes hors saison soient un peu moins fréquentes » (P. ESTIENNE, 1956).

Le bien fondé de la coupure décembre-mai inclus et juin-novembre est vérifié par une étude détaillée des effets hydrologiques de tous les épisodes pluvieux sur les hauts bassins de l'Allier et de la Loire au cours de sept années, de 1958 à 1964 (M. DACHARRY, 1966). Sur les quatre-vingt-seize averses retenues pendant cette période en amont de Lavalette (394 km²) sur l'Allier, dix ont eu lieu en novembre et dix en mai. Dans trois cas seulement sur dix, les « crues » ou plutôt les intumescences de novembre ont été influencées par la neige tandis qu'au mois de mai, la proportion des crues « nivales » par rapport aux crues « pluviales » est exactement inverse : sept « nivales » sur dix. Le semestre de décembre à mai est donc le plus marqué par des chutes, des rétentions et des fusions nivales, le plus souvent discontinues.

---

(11) Pour des raisons évidentes, liées au rôle saisonnier de l'évapotranspiration, les deux semestres les plus souvent opposés dans les régions de la zone tempérée sont le semestre froid d'octobre à avril et le semestre chaud d'avril à octobre.

(12) De nombreux exemples de l'apparition relativement tardive de la neige et de la rudesse des printemps sont cités dans les thèses de géographie régionale, spécialement celles de L. GACHON (1939), P. ESTIENNE (1956, pages 49-61) et A. PERPILLOU (1940, pages 90-141).

Il se trouve que ce partage de l'année a également une signification bio-climatique pour les hautes terres du Massif Central. En effet, les chiffres de précipitations de l'hiver et du printemps additionnées constituent, suivant A. FEL ([13]), un très bon indice d'aptitude herbagère : contrairement aux pluies d'automne, d'octobre à décembre, de peu d'effet sur la production de l'herbe, les pluies de décembre à mai sont les plus « utiles à la prairie » car elles assurent au sol une humidité printanière favorable. Les exigences agricoles peuvent, en l'espèce, renseigner indirectement sur les réserves accumulées dans ou sur le sol, facteur si important de l'écoulement fluvial.

Au point de vue hydrologique, la fiche d'identification des bassins renseigne enfin sur l'*abondance moyenne de la rivière* à l'issue du bassin jaugé, cette abondance moyenne ayant été calculée sur le plus grand nombre possible d'années. Le *régime* est indiqué par la courbe des débits mensuels (en mm) directement comparable à celle des pluies, les deux courbes étant rapprochées plus pour une comparaison des régimes que pour la présentation des bilans d'écoulement. Ceux-ci feront l'objet d'une étude critique dans la troisième partie.

([13]) « Les pluies d'automne, d'octobre à décembre, sont les moins utiles pour l'herbage ; déjà le foin de la deuxième coupe est rentré dans les fenils et l'humidité ne peut qu'entretenir et prolonger quelque peu la vie des graminées dans les pacages. D'ailleurs, la température est généralement trop basse pour que l'herbe puisse utiliser vraiment les précipitations. Tout un « surplus » d'eau est perdu, particulièrement dans les régions les plus élevées de la montagne. Les pluies d'été, celles qui se produisent de juillet à septembre, entre la première et la deuxième coupe de foin, comptent davantage puisque leur abondance retentit directement sur le volume du « regain ». Mais on ne doit pas surestimer l'importance de cette seconde fauchaison dans l'économie traditionnelle : le foin de septembre et d'octobre compte plus souvent pour un dixième que pour un quart dans l'ensemble du fourrage récolté. C'est sur la première coupe que portent l'espoir et le soin du paysan. En moyenne montagne, le rôle des précipitations printanières apparaît décisif dans la réussite de la prairie... Une abondante récolte de foin est préparée par une forte humidité dont les effets se prolongent jusqu'aux derniers jours du printemps... La considération de l'humidité printanière deviendrait insuffisante si l'on se tournait vers des régions plus élevées. Alors le rôle des précipitations hivernales augmente considérablement. En toute logique, on devrait retenir dans le total des précipitations utiles à la prairie toute la tranche d'eau tombée sous forme de neige qui reste à la disposition de l'herbe au moment du reverdissement. Plus on s'élève et plus cette fraction des précipitations hivernales utiles grandit. Au niveau des hameaux les plus montagnards, on ne peut même plus négliger le stock de neige de décembre. Ainsi le meilleur indice d'aptitude herbagère, pour l'ensemble de notre domaine nous paraît constitué par les chiffres des précipitations de l'hiver et du printemps additionnés. Le facteur « température » semblant jouer un rôle plus discret, mais non négligeable. » (A. FEL, 1962, chapitre II : les fondements naturels des traditions agraires.)

B. **Récapitulation d'ensemble des principaux traits**

1. *Les points communs*

Dans une brève synthèse, les caractères communs aux différents bassins sont faciles à reconnaître. C'est d'abord une *altitude* généralement forte puisque le bassin le moins élevé, celui de la Besbre, en amont de Mayet-de-Montagne, se développe à 775 mètres d'altitude moyenne et que treize bassins sur vingt et un ont une altitude moyenne supérieure à 1.000 mètres (tableau n° 16). Le rapport, pour chaque bassin, entre l'altitude maximum absolue et l'altitude moyenne, bon indice du degré d'aération du relief, est faible et varie peu, de 1,19 (bassin du Vernazon aux sources de la Loire, 51 km²), à 2 (bassin de la Couze Chambon, à Champeix, descendant du Massif du Sancy, 166 km²). (14)

Il résulte de ces deux traits relatifs à l'altitude que le rôle de la neige, partout possible pendant six mois de l'année, est cependant très irrégulier d'une année à l'autre et, le plus souvent, intermittent au cours d'un même hiver. La neige ne couvre alors en permanence que les sommets les plus élevés de cette moyenne montagne (Mont-Dore, Forez, Haute-Margeride et Mézenc, au-dessus de 1.400 mètres) et sa fonte ne nourrit pas régulièrement les débits printaniers comme dans les montagnes élevées où le manteau nival disparaît progressivement, au printemps et en été, des tranches d'altitude de plus en plus élevées. Les fusions sont multiples au cours de l'hiver et brusques car, déterminées par une élévation de la température ou une averse de pluie, elles s'étendent généralement aux entiers ou à une très grande partie des bassins dont l'altitude est peu différenciée. Les volumes d'eau ainsi retenus puis libérés sont évidemment d'autant plus forts que les précipitations hivernales sont plus élevées.

Or, second caractère commun, les *précipitations de décembre à mai* qui peuvent être « nivales » sont minoritaires. Elles ne constituent que dans quatre bassins la moitié des précipitations annuelles (bassins de l'Alagnon à Joursac : 53 %, de la Couze Pavin à Saint-Floret : 53 %, du Lignon du Forez à Rory : 49,5 %, de la Besbre à Mayet-de-Montagne : 49 %) et, dans les cas de plus grande abondance, elles n'atteignent jamais 800 mm. Pour l'ensemble des hauts bassins de la Loire (à Bas-en-Basset, 3.300 km²) et de l'Allier (à Vieille-Brioude, 2.260 km²), elles sont de 331 et de 393 mm (43 % et 45 % des totaux annuels)

(14) Les exemples de la valeur de ce rapport, cités par M. DERRUAU dans son Précis de Morphologie (Masson, Paris, 1958) sont devenus classiques et donnent des éléments utiles d'appréciation de l'indice. L'Auvergne culmine à 1.886 mètres (Puy de Sancy) et la Corse à 2.710 mètres, mais les altitudes moyennes étant respectivement de 846 mètres et de 570 mètres, les indices d'aération sont de 2,2 pour l'Auvergne et de 4,8 pour la Corse.

(tableau n° 17). Sauf les deux petits bassins les plus élevés de la haute Loire (Rieutord : 1.290 mètres d'altitude moyenne ; Le Crouzet : 1.230 mètres d'altitude moyenne), le petit appendice du bassin de l'Alagnon sur le flanc du Cantal, le bassin également marginal de la Couze Pavin et le bassin le plus septentrional de la Besbre, c'est bien un domaine d'élection du pin sylvestre, voire du seigle quand la chaleur estivale est suffisante.

La troisième ressemblance entre la plupart de ces bassins témoins se rapporte à la *lithologie* (tableau n° 16). A l'exception de cinq bassins où les terrains volcaniques affleurent sur la plus grande partie de la superficie :

— bassin de l'Alagnon, en amont de Joursac (87 %), à la limite du Cantal et du Cézallier,

— bassins des Couze Pavin et Chambon (78 % et 70 %), sur le flanc oriental du massif du Mont-Dore,

— bassin de la Gazeille (76 %) appuyé au Mézenc, à la terminaison sud-orientale du bassin volcanique du Puy,

— bassin de la Borne (55 %) comportant une large partie du plateau basaltique du Devès oriental,

le socle granitique ou gneissique constitue partout un substratum imperméable plus ou moins masqué par une couche d'altérites perméables dont le rôle hydrologique varie avec l'épaisseur, la granulométrie, la porosité et, principalement, la pente du substratum. Car, finalement, c'est peut-être surtout la valeur de cette pente qui favorise ou empêche le maintien sur place des formations superficielles et qui règle le tri des éléments plus ou moins grossiers composant ces arènes.

L'imperméabilité n'est pas le caractère des seuls terrains granitiques ou cristallophylliens. Les andésites et les labradorites de la haute vallée du Lignon du Velay, les dykes mis à nu par les érosions torrentielle et glaciaire du Quaternaire dans la haute vallée de la Couze Chambon (cirque de Chaudefour), les lambeaux sédimentaires du dévonien et du dinantien dans le bassin de la haute Besbre, sont des terrains imperméables.

A l'inverse, le caractère perméable des couvertures basaltiques n'a pas toujours l'importance que le pourcentage des affleurements volcaniques porté dans le tableau n° 16 pourrait suggérer. L'exemple en est donné par le bassin de la Gazeille où le socle cristallin, peu profond, apparaît dans toutes les vallées et où la couverture volcanique très démantelée est à prédominance sableuse. Les roches sédimentaires et les alluvions, aux rares places où elles se trouvent (bassin de la Borne : 12 % ; bassin de l'Alagnon : 12 % ; bassin de la Couze Chambon : 10 % ; bassin de la Dore : 9 %) sont toujours des sables plaqués sur le socle cristallin ou recouvrant des niveaux d'argiles sableuses imperméables. Au total, c'est ce contraste entre un substratum imperméable

et une couverture de sable qui domine. Même dans les altérites basaltiques, le pourcentage des sables par rapport aux éléments fins (inférieurs à 0,05 mm) reste fort, comme le montrent les résultats d'analyses physiques de sols effectuées en différents lieux du bassin et sur des roches-mères différentes (tableau n° 18) ([15]).

Cette couverture sableuse qui peut atteindre quatre à six mètres localement dans les hauts bassins de la Sioule ou de l'Allier, est le plus souvent peu épaisse, de 1 m 50 à 2 mètres ou beaucoup moins. Elle se prête à une infiltration rapide. Si la pente est forte, la restitution aussi est rapide. Mais si la pente est faible, l'eau accumulée peut y être soumise à une forte évaporation en été. Toutefois, dans l'ensemble, la réserve disponible n'est pas très élevée.

2. *Les hétérogénéités principales*

Sur ce fond commun de bassins montagnards où, malgré une forte altitude moyenne, le rôle de la neige est cependant irrégulier et où les formations perméables de couverture ne semblent pas à priori modifier sensiblement le comportement hydrologique du sous-sol imperméable, la diversité ne manque pas.

Elle s'exprime d'abord dans la taille des bassins, dans leur forme et dans leur pente. La forte altitude moyenne n'est pas propre aux plus petits bassins comme le montre le tableau n° 16 où le critère de classement a précisément été l'altitude moyenne. Celle-ci, par exemple, est comparable (1.207 mètres et 1.205 mètres) pour le bassin de la Gazeille de 88 km² et celui du Chapeauroux de 389 km². Elle est la même (1.140 mètres) pour le bassin de l'Allier à Alleyras-Poutès (934 km²) et celui du Lignon du Forez à Rory, huit fois plus petit (115 km²). Un même rapprochement s'applique encore au bassin de la Couze Pavin à Saint-Floret (219 km²) et au bassin de l'Allier à Vieille-Brioude (2.260 km²). Les bassins de taille comparable diffèrent par la forme et surtout par la répartition des tranches d'altitude. Trois principaux types morphologiques, faciles à repérer sur les profils hypsométriques et correspondant à des conditions particulières d'écoulement, sont inégalement représentés dans chaque bassin (cf. fiches de bassin, tome II).

Dans les régions d'amont, zones de réception des eaux et d'organisation du draînage, qui sont figurées au sommet des courbes, les pentes des talwegs et des versants sont fortes. Les rivières sont généralement incisées dans la roche le plus souvent à nu en raison de la pente, et la concentration des eaux est d'autant plus rapide que la pente est plus forte, que les affluents sont plus nombreux et que le sol est plus imperméable.

([15]) Ces analyses ont été effectuées par C. MAITRE et J. TRAUTMANN (1968) et par la Direction Départementale de l'Agriculture de la Haute-Loire - Le Puy. cf. STARON (1970).

Dans les bassins des Couze Chambon et Pavin, de l'Alagnon, du Lignon du Forez, de la Loire (Bas-en-Basset), ces fortes pentes tiennent davantage de place que, par exemple, dans les bassins du Chapeauroux, de la Loire à Rieutord, du Vernazon, de la Sénouire ou de l'Allier à Vieille-Brioude.

Les zones de pente faible, figurées sur les profils hypsométriques par un secteur médian peu incliné, constituent le second type morphologique, bien représenté dans les bassins de la Borne, du Chapeauroux et de la Sioule, plus développé dans le bassin de la Couze Pavin que dans le bassin contigu de la Couze Champeix. Ce sont les régions d'interfluves aux formes arrondies, de surfaces d'aplanissement, des vallées mûres, pays des « moulières » et des « sagnes » où les formations superficielles ont le maximum d'influence sur l'écoulement des eaux car elles y atteignent leur plus grande épaisseur. Elles empâtent le bas des pentes et les talwegs où s'accumulent les éléments les plus fins des masses spongieuses qui, après les pluies, sont gorgées d'eau.

Le troisième type morphologique multiplie les pentes raides et les vallées encaissées aux altitudes les plus basses des bassins (bas des courbes hypsométriques). Les bassins de la Sioule, du Lignon vellave, de la Couze Pavin, du Chapeauroux en sont les meilleurs exemples. Les dépôts très minces des pentes, quand ils existent, y sont pratiquement sans influence sur les écoulements superficiels et hypodermiques très rapides.

La courbe schématique des pentes en France dressée par J.P. DEFFONTAINES [16] donne une image d'ensemble expressive de l'extension dans les différents bassins de ces trois types morphologiques déjà visibles sur les courbes hypsométriques (figure 13). Elle confirme assez bien les observations des morphologues de Strasbourg sur l'influence de la pente en hydrologie [17].

Il est, grâce à elle, possible, même à l'échelle bien petite du

[16] J.P. DEFFONTAINES, chargé de recherches à l'I.N.R.A. — Carte schématique des pentes en France. Ministère de l'Agriculture (1968). L'auteur, s'étant attaché à faire l'inventaire des potentialités agricoles, a cherché à définir des zones homogènes présentant un ensemble de caractères topographiques semblables. La carte a été dressée à l'échelle du 1/500.000ème et publiée au 1/1.000.000ème. L'unité d'examen des pentes est le carré de 2,5 km de côté, ce qui permet, pour des bassins atteignant 200 km², une analyse assez fine. Le souci agronomique de l'auteur n'est pas le nôtre mais il n'a pu négliger les conditions d'écoulement des eaux, si importantes en agriculture, dans son travail de classement des pentes (cf. légende de la figure 13).

[17] C. MAITRE et J. TRAUTMAN (1968). Les cartes de pentes du Centre de Géographie Appliquée de Strasbourg distinguent habituellement les six classes de pentes suivantes : inférieures à 1°, de 1 à 5°, de 5 à 12°, de 12 à 20°, de 20 à 35°, supérieures à 35°. En fait, pour le bassin du Sioulet en amont de Pontaumur (une partie de notre bassin versant de la Sioule à Pont-du-Bouchet, op. cit. pp. 91 à 103 et 210 à 215), nos types morphologiques correspondraient assez bien aux classes 1 et 2 réunies pour les régions de faible déclivité (moins de 8,75 %), à la classe de 5 à 12° (de 8,75 % à 21,26 %) pour les zones d'amont ou de déclivité moyenne, aux classes au-dessus de 12° (21,26 %) pour les versants redressés où l'infiltration est faible.

1/1.000.000ème de comparer les bassins à profils différents dans lesquels, par exemple, la zone d'influence maximum du manteau d'altérite (déclivité inférieure à 8 % c'est-à-dire à peu près à 5°) couvre des superficies relatives diverses :

5 % dans le bassin du Lignon du Forez de 115 km²,
68 % dans le bassin du Lignon du Velay de 700 km²,
71 % dans le bassin de l'Ance du Nord de 354 km²,
78 % dans le bassin de l'Allier à Lavalette de 394 km²,
90 % dans le bassin du Chapeauroux de 389 km²,
92 % dans le bassin de la Sioule de 1.170 km².

A défaut de carte plus précise des pentes pour l'ensemble de la France, celle-ci donne des indications utiles à l'interprétation des bilans moyens ou particuliers.

Après les caractères morphologiques, les indices qui offrent le plus de diversité d'un bassin à l'autre sont relatifs à la répartition mensuelle et saisonnière des pluies, ainsi que le montrent les résultats rassemblés dans le tableau n° 17. L'indice de concentration saisonnière de PEGUY y évolue de 1,10 (Lignon du Forez à Rory) à 1,60 (Loire à Rieutord). Le trimestre de plus grande pluviosité est l'automne dans douze bassins sur vingt et un, le printemps dans chaque bassin, l'été dans trois bassins et l'hiver dans un seul, dans tous les cas selon des groupements de mois très divers : douze combinaisons différentes. Les hauteurs extrêmes de pluies annuelles moyennes globales varient de moins de 800 mm (767 mm sur le bassin de la Sénouire et 775 mm sur celui de la Borne) à environ 1.600 mm (1.580 mm sur le bassin du Vernazon et 1.670 mm sur celui de la Loire en amont de Rieutord) soit du simple au double. Des bassins recevant des hauteurs d'eau à peu près égales, tels ceux du Chapeauroux (845 mm) et de l'Ance du nord (878 mm) ont des régimes pluviométriques très différents. Il en est de même des bassins de l'Alagnon à l'amont de Joursac et de l'Allier à Lavalette qui reçoivent 1.170 mm et 1.185 mm par an, de ceux de la Couze Chambon à Champeix (1.060 mm) et du Langouyrou à Langogne (1.070 mm). La température et l'évapotranspiration peuvent donc avoir des effets très différents suivant la saison de plus grande abondance. Les altitudes maxima et moyennes des bassins ne sont pas assez différenciées pour qu'une corrélation soit établie entre abondance pluviale et altitude : le bassin de la Besbre, par exemple, le moins élevé (775 m d'altitude moyenne) est l'un des plus arrosés (1.235 mm de pluie annuelle). L'exposition des bassins aux vents pluvieux est le facteur déterminant de l'abondance et des régimes pluviaux, et la position en latitude a finalement plus d'importance que l'altitude sur la distribution des précipitations. Comme, de surcroît, des hauteurs de pluies identiques semblablement réparties peuvent tomber avec des intensités très différentes sur des bassins de forme, de pente, de lithologie diverses, il est naturel que les débits, eux non

plus, ne soient pas uniformes.

Telle est bien, en effet, l'impression première que laissent les débits spécifiques et les coefficients mensuels de débit aux vingt et une stations témoins. Pour des bassins contigus de même taille et de même régime pluviométrique (même groupement des trois mois les plus arrosés, s o N), l'Allier à Lavalette (394 km²) et le Chapeauroux (389 km²) débitent en moyenne par an, l'un 23,1 l/s/km² et son affluent 13,3 l/s/km², soit presque deux fois moins. Les trois principaux tributaires de la Loire vellave, la Borne, le Lignon du Velay et l'Ance du Nord, ont des débits spécifiques très inégaux de :

8,7 l/s/km² (Borne, 430 km²),
17,6 l/s/km² (Lignon, 700 km²),
12,4 l/s/km² (Ance du Nord, 354 km²).

Pour des bassins où le régime pluviométrique est semblable avec des totaux annuels inégaux, par exemple ceux du Langouyrou à Langogne (66 km²) et de la Loire à Rieutord (62 km²), l'évolution des coefficients mensuels de débit est sensiblement différente puisque les plus forts débits se produisent, pour la Loire, en novembre (c.m.d. = 1,90) et, pour le Langouyrou, en mars (c.m.d. = 1,80). Le rôle de la neige et du complexe physique du bassin versant y sont évidemment dissemblables. Les deux rivières jumelles, la Loire à Bas-en-Basset (3.300 km²) et l'Allier à Vieille-Brioude (2.260 km²) dont les bassins reçoivent respectivement, en moyenne, 900 et 876 mm de pluie ont bien le même régime complexe originel pluvio-nival avec maximum principal en mars plus fort que la recrudescence pluviale de novembre et des basses eaux d'été beaucoup plus faibles que celles de l'hiver, qui, elles-mêmes, sont causées davantage par la médiocrité des précipitations que par la rétention nivale. Cependant, le régime de l'Allier comparé à celui de la Loire sur la même période de cinquante ans, de 1919 à 1968, est plus irrégulier que celui de la Loire puisque le rapport des moyennes mensuelles extrêmes y est de 9,9 alors que, sur la Loire, il est de 6,4.

Les exemples de ces diversités hydrologiques pourraient être multipliés pour montrer la sensibilité des cours d'eau aux multiples facteurs qui en règlent le débit. Ils prouvent aussi que le débit constitue toujours le meilleur indice du rôle propre, dans un bassin, de chacun des facteurs de l'écoulement et que les provinces hydrologiques, qui ne coïncident pas nécessairement avec les régions pluviométriques, doivent correspondre mieux que ces dernières aux complexes naturels juxtaposés dans l'espace. Il reste que la connaissance du comportement moyen des rivières ne suffit pas pour apprécier la part des éléments plus ou moins hétérogènes qu'intègre le débit d'un grand fleuve comme la Loire. Force est bien d'en venir aux fluctuations quotidiennes des eaux et aux situations concrètes pour saisir les types d'oscillations dans l'abondance ou la pénurie, qui, successivement, composent le vrai visage du fleuve.

DEUXIEME PARTIE

LA VIE DU FLEUVE, SON RÉGIME

QUELQUES POINTS DE METHODE

« Le régime des fleuves et des rivières donne une captivante impression de vie. Un cours d'eau, comme un climat, est doué souvent d'un caractère complexe, comme celui des êtres humains. Le plus ignorant peut constater certaines manifestations lentes ou rapides de cette personnalité. Les épisodes de l'hydrologie ressemblent aux phases d'un roman ou d'un drame ... »

L'analogie relevée par le professeur PARDE [1] entre des êtres relevant d'essences aussi différentes que les cours d'eau et les personnes humaines ne doit pas être poussée trop loin. Elle ne prétend rien suggérer de plus que l'originalité irréductible de l'ensemble des multiples causes qui concourent à faire un fleuve différent des autres fleuves. Sous cette réserve, la portée de la remarque du professeur PARDE ne saurait être limitée : un fleuve se révèle, du premier au dernier pas de son étude, comme réalité complexe, singulière, cohérente. Ces trois caractères ont trop de force pour que la méthode d'analyse n'en soit pas marquée, pour qu'ils ne suggèrent pas trois soucis dans l'observation des faits, celui de la complexité, celui de la singularité et celui de la synthèse cohérente de l'ensemble.

La *complexité* de la vie d'un fleuve est due à l'interférence de traits nombreux et variés, reflets eux-mêmes de la diversité des facteurs de l'écoulement. Parmi les variations du débit, les unes sont en liaison étroite avec le cadre morphologique et géologique du bassin, d'autres avec les oscillations et les répétitions régulières de certaines composantes du climat ; d'autres variations enfin sont, au contraire, apparemment fortuites, imprévisibles, exceptionnelles. La définition du régime doit discerner ce qui est durable, constant, attendu, de ce qui est occasionnel, accidentel, aberrant ; et cela à l'échelle des saisons comme à l'échelle des mois et des jours. Seule une longue familiarité avec l'objet d'étude peut donner cette connaissance concrète de son comportement. Le « tempérament » de la rivière est bien connu du riverain, à qui il arrive pourtant de se laisser surprendre. Il s'exprime aussi avec clarté sur les hydrogrammes et d'une façon très éloquente encore sur les courbes de débits moyens journaliers quand le bassin est assez grand pour que le « temps de réponse » dépasse vingt-quatre heures. Mais, avec les débits

(1) Introduction à la première édition de l'ouvrage " Fleuves et Rivières » (1933).

moyens mensuels et, a fortiori, les moyennes des débits moyens mensuels et annuels de plusieurs années, le portrait devient de plus en plus schématique : il conserve des traits saillants encore qu'atténués qui ne sont qu'une partie de la réalité et il néglige, dans le comportement habituel, ce qui peut être le plus significatif, le plus utile à connaître : les montées rapides et la descente des eaux, la manière et la fréquence de ces intumescences qui sont comme la respiration tantôt régulière, tantôt entrecoupée du fleuve, leur rapport avec le régime moyen. La connaissance des variations journalières, voire horaires, du débit contribue à caractériser l'immodération ou la pondération d'un régime tout autant que l'écart entre les moyennes mensuelles les plus fortes et les plus faibles. Il n'est pas indifférent par exemple de savoir si le débit moyen mensuel est dû à la succession de journées calmes et égales ou à des pulsations brutales dans un lit presque toujours à sec. C'est donc sur la totalité des traits permanents et accidentels que doit se fonder l'étude du régime, sur la fréquence et la variabilité des états du fleuve, sur la répartition saisonnière de cette fréquence et de cette variabilité. Les seules moyennes ne suffisent pas à expliquer.

La *singularité* au sein du genre spécifique est un fait de nature auquel les cours d'eau ne font pas exception : aucun cours d'eau n'est exactement pareil aux autres d'une même famille. Les premiers éléments sur les régimes, réunis sur les fiches des bassins témoins ont donné un aperçu de ces hétérogénéités. Ici, l'attention sera portée davantage sur ce qui différencie les rivières les unes des autres que sur ce qui les rapproche. Deux exemples illustrent ce souci d'expliquer les nuances à l'intérieur d'un même type de régime. Dès l'introduction, l'irrégularité de la Loire à Gien a été mise en relief par rapport à d'autres rivières coulant dans les régions de climat tempéré océanique. Le rapport des moyennes mensuelles extrêmes est, à Gien, de 6,6, plus fort que celui de la Seine à Paris (5,75), de la Garonne au Mas d'Agenais (5,35) ou de la Moselle à Cochem (4,4). Cette immodération relative dans la même région climatique appelle explication. L'autre exemple est tiré de la comparaison esquissée aux dernières pages du chapitre précédent entre les régimes de la Loire à Bas-en-Basset et de l'Allier à Vieille-Brioude. Les deux rivières sœurs ont le même type de régime mais l'Allier est plus immodéré quel que soit le groupement d'années. Le rapport des moyennes mensuelles extrêmes est de 6,4 sur la Loire et de 9,9 sur l'Allier pour la plus longue période considérée. La raison de cette dissemblance n'est pas simple : cours plus torrentiel de l'affluent au profil longitudinal plus tendu que celui de la Loire (figure 14), effet plus pondérateur de la neige sur le débit de la Loire que sur celui de l'Allier en raison du relief plus différencié et plus délié du bassin de la Loire (cf. courbes hypsométriques sur les fiches de bassin), rôle régulateur des terrains basaltiques et alluviaux constituant 36 % du bassin de la Loire à Bas-

en-Basset et 20 % seulement du bassin de l'Allier à Vieille-Brioude, différences dans l'évapotranspiration et les quotients d'écoulement mensuel (2).

Or, en aval, à la confluence des deux rivières, le caractère d'immodération est inversé. La Loire est, à son tour, plus excessive que l'Allier dans ses oscillations journalières (figure 15[1-2-3]) et dans ses écarts mensuels inscrits dans le tableau n° 19, pour les mêmes groupes d'années.

TABLEAU N° 19

RAPPORTS DES MOYENNES MENSUELLES EXTRÊMES DE LA LOIRE ET DE L'ALLIER

	1919-1968	1921-1960	1955-1968	1956-1965
LOIRE à Bas-en-Basset	6,4	6,8	5,1	4,8
ALLIER à Vieille-Brioude	9,9	11,1	7,7	6,7
LOIRE à Nevers			7,4	5,4
ALLIER à Pont-du-Guétin			5,8	4,7

Il peut être invoqué que la Loire, au Bec d'Allier, est plus excessive parce qu'elle a, dans son cours supérieur, des façades plus exposées aux influences méditerranéennes que ne l'est le haut bassin de l'Allier. Mais, alors, peut-on ignorer ce caractère propre à la Loire pour la comparaison des régimes en amont (Bas-en-Basset et Vieille-Brioude), là où l'influence méditerranéenne devrait être précisément la plus forte ?

Ce dernier paradoxe qui justifie l'intérêt porté aux singularités de la Loire et de ses affluents parmi les rivières du domaine tempéré océanique, introduit au troisième caractère révélé par l'analyse du régime, à savoir la *cohérence* interne du fleuve quand, s'avançant dans le Bassin Parisien, il a acquis les traits stables de sa maturité. La fin précise de cette étude est le régime de la Loire à Gien. Les régimes des flots élémentaires qui concourent à l'alimentation seront seulement étudiés pour une meilleure et plus complète explication du régime à Gien. Il s'agit, en effet, de comprendre comment se composent, se renforcent ou se compensent les influences successives le long de l'unique artère maîtresse.

(2) à ne pas confondre avec le coefficient mensuel de débit. Celui-ci est, selon le terme créé par A. COUTAGNE, le rapport du débit moyen mensuel au module. Le coefficient ou quotient d'écoulement mensuel est le rapport, dans le même mois, de la lame d'eau écoulée à la lame d'eau précipitée.

Ces principes relatifs aux méthodes d'analyse inspirent toutes les investigations qui suivent sur les variations du débit et les causes de ces variations. L'étude des faits procède dans l'ordre très classique d'exposé qui s'applique successivement aux variations saisonnières, aux étiages et aux crues.

CHAPITRE I

UNE DIFFICULTE DE LA DEFINITION DES REGIMES : LA VARIABILITE INTERANNUELLE DES DEBITS MENSUELS

L'alternance régulière des hautes eaux de saison froide et des basses eaux de saison chaude est un trait dominant de la Loire à Gien. Ce rythme que connaît bien le riverain le plus distrait, les moyennes mensuelles de débit le confirment et leur évolution annuelle confère à la courbe des coefficients mensuels de débit sa « simplicité » dont la cause réside dans la prédominance d'un facteur climatique : l'alimentation pluviale.

A première vue, les chiffres réunis dans le tableau n° 20 ne laissent aucun doute sur l'appartenance de la Loire à l'espèce pluviale tempérée océanique, selon la typologie classique des régimes fluviaux établie avec précision par M. PARDE et abondamment illustrée par lui-même et d'autres géographes après lui (1).

Cependant, cette définition exclusivement fondée sur les moyennes mensuelles de débit, suppose que la période de quarante années considérées est suffisante pour donner une image fidèle des variations saisonnières du fleuve. En est-il bien ainsi ? La Loire et ses affluents qui sont déjà apparus, quant à la variabilité interannuelle des modules, parmi les plus irréguliers dans la zone tempérée (2) ont aussi des débits mensuels fort variables d'une année à l'autre. Avant d'expliquer les comportements hydrologiques saisonniers dans les bassins élémentaires et la genèse du régime du fleuve, il importe donc d'apprécier le degré

(1) essentiellement, parmi les géographes français : R. FRECAUT (1964), A. GUILCHER (1965), M. LACHIVER (1963) et M. ROCHEFORT (1963).

(2) cf. chapitre II (1ère partie) : les coefficients de variation des modules calculés varient de 0,28 pour la Borne (50 ans) à 0,43 pour le Lignon vellave. Ce coefficient est de : 0,26 pour la Durance à Mirabeau (1904-1962), 0,27 pour l'Ain à Cisse (1923-1962), 0,27 pour la Moselle à Cochem (1901-1962), 0,31 pour la Garonne au Mas d'Agenais (1913-1963), 0,33 pour la Tamise à Teddington (1883-1964), 0,34 pour le Verdon à Quinson (1906-1962), 0,36 pour la Seine à Paris (1906-1962) (P. BOIS, 1968).

de fixité ou de fantaisie des débits moyens mensuels pendant le plus grand nombre possible d'années.

En fait, la variabilité des débits moyens mensuels se manifeste de deux façons. D'une part, les dates d'occurence des maximum et minimum annuels diffèrent d'une année à l'autre et même d'un groupe d'années à l'autre. D'autre part, les débits moyens d'un même mois accusent des irrégularités très sensibles. Ce double aspect de l'irrégularité est une caractéristique essentielle de toutes les rivières du bassin, à des degrés divers cependant.

I. VARIABILITE DE LA DATE DES HAUTES ET BASSES EAUX ANNUELLES

A. Que les moyennes mensuelles maximales surviennent en n'importe quel mois de saison froide et les moyennes mensuelles minimales en n'importe quel mois de saison chaude, quelle que soit la valeur du débit brut, ne saurait être un phénomène vraiment inattendu. Les régimes pluviaux ou pluvio-nivaux tempérés comme ceux de la Loire et de ses tributaires traduisent ainsi la grande irrégularité des pluies en toutes saisons. Le tableau n° 21 A et B en administre la preuve pour quinze stations hydrométriques où ont été calculées les fréquences des débits maxima et minima annuels en chaque mois de l'année pour des périodes allant de 32 à 52 ans suivant les lieux.

Le *première remarque* que suggère ce double tableau est que les basses eaux d'été ont des débits plus réguliers que les hautes eaux de saison froide et une durée d'existence plus courte dans l'année. Tandis que les maxima sont, en général, répartis sur neuf mois, les minima surviennent de juin à octobre, soit au cours de cinq mois seulement. Août est le plus souvent le mois des basses eaux des rivières considérées, sauf sur l'Allanche à Pont-du-Vernet et sur la Sénouire à Paulhaguet où la fréquence maximale s'observe en juillet. Il est arrivé que l'hiver soit, exceptionnellement, la saison des plus basses eaux de l'année, une fois sur l'Ance du Nord à Laprat, une fois sur la Dore à Giroux et trois fois sur le Lignon du Forez à Rory. Mais même sur cette dernière rivière qui draîne un petit bassin de forte altitude moyenne (1.140 mètres) sur le flanc oriental du massif de Pierre-sur-Haute (1.640 mètres), il faut noter que les trois minima, de février 1927, 1930 et 1963 n'ont pas été dus à la rétention nivale mais à la faiblesse relative des précipitations en ce mois ([3]). C'est également le cas du minimum annuel d'avril de la Dore en 1938, causé par une sécheresse prolongée et inhabituelle en

([3]) En 1930, notamment, la seconde quinzaine de janvier a connu un temps doux sans pluie et la seconde quinzaine de février a été particulièrement froide et sèche.

mars et en avril : 14 mm et 4 mm de pluie enregistrés respectivement pour ces deux mois à Notre-Dame de Mons, au lieu de 66 mm et de 77 mm en moyenne. La même dépendance étroite des pluies se vérifie en février 1932 sur l'Ance du Nord dont le bassin n'a pratiquement reçu aucune précipitation au cours de ce mois d'hiver. A l'exception de ces très rares cas de sécheresse hivernale, les basses eaux sont concentrées en été où le maximum mensuel de fréquence peut atteindre 55 % et ne descend nulle part au-dessous de 33,3 %, c'est-à-dire que son rythme moyen est exactement, en ce dernier cas, d'une année sur trois.

Les maxima d'hiver sont beaucoup plus fantaisistes puisque le mois des plus hautes eaux moyennes a un maximum de fréquence de 33,3 % seulement dans le meilleur des cas (Couze Chambon à Champeix) et de 14,3 % dans le plus faible (la Borne à Chadrac) (4).

Du tableau n° 21 A se dégage une *seconde remarque* qui incite à la prudence dans la recherche d'une définition du régime par les seules moyennes mensuelles : non seulement le mois du maximum de fréquence est très variable mais, en outre, sur plusieurs rivières (sept stations sur quinze), le mois de plus fort débit moyen ne correspond pas au mois où les hautes eaux se manifestent avec le plus de régularité.

Ainsi, pour l'Allanche à Pont-du-Vernet, au sud du Cézallier, le débit moyen mensuel le plus fort se place en janvier alors que c'est durant le mois de mars que le maximum annuel se produit le plus souvent. La Dunière à Vaubarlet offre à l'observation un décalage du même genre entre le mois des plus hautes eaux moyennes qui est mars et celui des hautes eaux les plus fréquentes qui est décembre, le mois de mai venant en seconde place, à égalité avec mars.

De ce phénomène, la Loire à Chadrac donne un autre exemple. En cinquante-deux ans, le maximum annuel s'est produit

11 fois en avril,
10 fois en novembre
10 fois en décembre,
9 fois en mars,

alors que ce dernier mois est « normalement » celui du plus fort débit.

De même encore, au Chambon-sur-Lignon (Velay), c'est au mois d'avril qu'est enregistrée le plus souvent la moyenne la plus forte de l'année alors que le maximum mensuel de quarante ans tombe, là aussi, en mars.

Les deux Couze voisines, de Pavin à Saint-Floret et de Chambon à Champeix, offrent une comparaison utile à la définition de leur régime.

(4) A Cochem sur la Basse-Moselle, en soixante ans (1901-1960), le maximum mensuel a été atteint dans 40 % des cas en janvier qui a aussi le plus fort coefficient mensuel de débit en année « normale ».

cf. R. FRECAUT (1971).

Pour les mêmes trente-quatre années (1929-1950 puis 1957-1968), les coefficients mensuels de débit évoluent de la façon suivante.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Couze de Pavin à Saint-Floret	1,47	1,52	1,49	1,38	1,07	0,77	0,42	0,35	0,39	0,56	1,07	1,48
Couze de Chambon à Champeix	1,50	1,42	1,37	1,31	1,15	0,81	0,44	0,38	0,46	0,67	1,12	1,38

Or, sur les deux rivières, le maximum annuel se produit le plus fréquemment au mois de janvier puis en décembre à Saint-Floret et en mars à Champeix.

Mais c'est la Borne qui l'emporte en caprice du maximum hivernal. En quarante-neuf ans, ce maximum a été atteint aussi souvent, sept fois, en janvier, en avril, en mai et en novembre, qu'en mars, mois du maximum mensuel global, et le mois de décembre qui a été six fois au palmarès suit de près le groupe de tête.

A Gien, enfin, dans la période de quarante ans comprise entre 1921 et 1960, alors que le coefficient mensuel de débit le plus fort correspond au mois de février, les mois de hautes eaux les plus fréquents ont été, dans l'ordre, décembre et mars (20 %) puis, à égalité, janvier et février (17,5 %).

B. De telles irrégularités d'occurence des maxima et des minima mensuels relevées, non plus sur des années particulières mais sur des groupes d'années, deviennent évidemment d'autant plus significatives que les périodes sont plus longues. D'un groupe d'années de dix ans à un autre, les régimes saisonniers changent considérablement sur une même rivière. Les moyennes mensuelles mobiles de dix ans aux stations de Vieille-Brioude, Bas-en-Basset, Villerest, Chadrac et Laprat (tableau n° 10) en donnent de nombreux exemples. Celui de la Loire à Villerest est des plus frappants. Les cinq décennies successives de 1920 à 1969 sont différentes entre elles et différentes aussi des moyennes globales dites « normales » de cinquante ans.

Des dates et des débits des deux maxima annuels et du minimum estival extraits du tableau n° 22, il résulte

1°) qu'une seule de ces cinq décennies a son maximum principal en mars comme dans le régime dit « normal »,

2°) que, de 1920 à 1939, l'automne a enregistré le maximum principal de l'année,

3°) que les moyennes de la seule décennie de 1940-1949 relèvent d'un régime simple sans intumescence automnale et purement pluvial avec son maximum principal en février,

4°) que le minimum annuel est beaucoup plus régulier, au moins quant à la date, que les maxima d'automne et surtout de printemps.

Des cinq rivières examinées en détail, la Borne remporte la palme de l'irrégularité et fait un singulier contraste avec l'Ance du Nord dont le bassin est pourtant tout proche. Pour l'Ance du Nord, sur les trente-neuf décennies, trente-six ont un maximum annuel de mars coïncidant avec le maximum « normal » et trois en avril. Pour la Borne, le maximum décennal est tombé

4 fois en novembre,
5 fois en décembre,
10 fois en février,
9 fois en mars,
9 fois en avril,
1 fois en mai,

alors que le maximum a lieu « normalement » en mars.

Des faits de cet ordre contraignent à s'interroger sur la valeur des classements de régimes fondés sur des moyennes mensuelles globales calculées pour vingt et même trente années. Les valeurs afférentes à des groupes de trente ans, de 1921 à 1950, de 1931 à 1960, de 1941 à 1970, sont comparées dans le tableau n° 23 à la période « normale » de

52 ans	à Chadrac (Loire)	1919-1970,
51 ans	à Bas-en-Basset (Loire)	1918-1968,
50 ans	à Vieille-Brioude (Allier)	1919-1968,
50 ans	à Giroux (Dore)	1919-1968,
50 ans	à Pont-du-Bouchet (Sioule)	1919-1968,
49 ans	à Villerest (Loire)	1920-1968,
49 ans	à Chadrac (Borne)	1919-1967,
48 ans	à Laprat (Ance du Nord)	1920-1967.

Les différences entre les évolutions mensuelles « globales » peuvent n'être pas négligeables. Ainsi, la Sioule dont le maximum pour la plus longue période se produit en janvier a, pour les deux périodes globales, un maximum de février. Le maximum de la Dore, à Giroux, apparaît en février pour les moyennes trentenaires et en mars pour les cinquantenaires avec, il est vrai, un avantage minime sur le mois précédent (16,5 m^3/s et 16,6 m^3/s).

Cependant, même dans le cas de la Borne à Chadrac qui se singularise par les déplacements de son maximum principal de mars à décembre au cours de la trentaine 1921-1950 et de son maximum secondaire de novembre ou décembre en avril, les décalages ne modifient pas fondamentalement les régimes des rivières retenues.

Il ne faut pourtant pas se hâter de conclure que les moyennes de trente ans suffisent pour caractériser les régimes car les fluctuations

des débits mensuels, plus encore que celles des dates de leur maxima, accusent des irrégularités d'une année à l'autre qui expliquent en fin de compte les fantaisies saisonnières.

II. LES ECARTS DES ABONDANCES MOYENNES « PARTICULIERES » D'UN MEME MOIS AVEC LA « NORMALE »

A. Tout d'abord, quels **critères** choisir pour mesurer cette variabilité interannuelle des débits moyens mensuels ?

Pour l'analyse des modules, le *coefficient de variation* peut suffire parce que les débits moyens annuels sont à peu près répartis « normalement », c'est-à-dire suivant une loi de GAUSS, de part et d'autre de la moyenne (5). Il n'en est pas de même des débits moyens mensuels dont la distribution est le plus souvent asymétrique, avec des valeurs très fortes en moins grand nombre que les valeurs faibles. La variabilité ne peut en être définie correctement par le seul coefficient de variation.

Si la distribution des débits moyens mensuels était conforme à une distribution de GALTON, hypothèse souvent admise quoique approximative (6), on pourrait assez commodément caractériser la variabilité par le coefficient de variation des logarithmes des valeurs mensuelles particulières qui, eux, sont répartis normalement.

Or, les distributions des différents mois ne sont ni exactement ajustées à une loi de GALTON ni identiques entre elles. Les douze histogrammes (figure 16) en donnent l'illustration : l'intervalle de variation des valeurs particulières est très inégal selon les mois, et le rapport entre la médiane et la moyenne varie de mois en mois,

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0,81	0,83	0,87	0,81	0,75	0,60	0,72	0,73	0,79	0,59	0,72	0,80

Les observations suivantes préciseront l'approximation avec laquelle peut être interprété au moyen de la loi de GALTON et, en général, d'une seule loi tout le champ des variations mensuelles d'un cours d'eau. La mesure des erreurs qui peuvent être faites dans la prévision mensuelle des débits, notamment de fréquence 10 % et 90 %, est donnée dans le tableau n° 24 se rapportant aux quatre stations fondamentales de Bas-en-Basset (Loire), Vieille-Brioude (Allier), Giroux (Dore) et Pont-du-Bouchet (Sioule). Y sont comparées :

(5) cf. 1ère partie, chapitre II, la définition du coefficient de variation (rapport de l'écart-type à la moyenne) et sa valeur pour décrire la variabilité des modules.

(6) P. BOIS (1968), M. ROCHE (1963) et J. RODIER (1964).

1°) les valeurs des quantiles de distribution des débits mensuels (en m^3/s) calculées sur des lois de GALTON ajustées aux observations de la période de quarante ans comprise entre 1920 et 1959,

2°) les valeurs des quantiles de distribution des débits mensuels réellement observées pendant une période plus longue, de cinquante ans. Pour la Loire à Bas-en-Basset, par exemple, les valeurs réelles du dernier quantile (débit décennal le plus fort) sont nettement supérieures (de 11,2 à 13,3 %) aux prévisions des mois de

janvier :	104	m^3/s	observés	au lieu de	78	calculés
juin :	78,5	m^3/s	observés	au lieu de	65	calculés
août :	18,8	m^3/s	observés	au lieu de	16,5	calculés
septembre :	35	m^3/s	observés	au lieu de	29	calculés
octobre :	80,5	m^3/s	observés	au lieu de	62	calculés
novembre :	123	m^3/s	observés	au lieu de	100	calculés

Au contraire, les débits sont plus faibles que les valeurs calculées en

février :	85,5	m^3/s	observés	au lieu de	89	calculés
mars :	111	m^3/s	observés	au lieu de	115	calculés
avril :	114	m^3/s	observés	au lieu de	115	calculés
mai :	96	m^3/s	observés	au lieu de	100	calculés
juillet :	30,9	m^3/s	observés	au lieu de	32	calculés
décembre :	92,5	m^3/s	observés	au lieu de	100	calculés

En réalité, la recherche hydrologique qui s'applique depuis une trentaine d'années à définir des courbes théoriques rencontre les plus grandes difficultés à les établir parce que les variations des débits extrêmes sont conditionnées différemment : celles des faibles débits par la nature du sol et la température, et les variations des forts débits par celles des fortes précipitations, le rôle de la rétention nivale produisant d'autres effets perturbateurs sur les courbes de probabilités (7).

Pour établir en quelque sorte la carte de la variabilité des débits mensuels, la présente analyse a retenu finalement les fréquences des débits réellement mesurés en des stations où les données sont les plus nombreuses et les plus sûres (8).

---

(7) Il serait intéressant de transposer aux débits les récentes recherches de P. DINGEN et H. STEYAERT sur les distributions des précipitations. Les auteurs qui ont appliqué aux données pluviométriques de l'observatoire de Gand (40 ans) une distribution également valable pour les pluies annuelles, mensuelles et journalières affirment la validité de la loi qu'ils proposent.

cf. P. DINGEN et H. STEYAERT (1971 a et b).

(8) Toutes les stations ont des relevés de trente ans et plus sauf la Coise pour laquelle les relevés s'étendent sur vingt-neuf ans, et le Chapeauroux dont les relevés portant sur seize ans seulement ont néanmoins paru riches d'enseignements.

Le *rapport des moyennes mensuelles extrêmes particulières* est propre à caractériser l'irrégularité de chaque mois. Il atteint ici des valeurs très différentes d'un mois à l'autre sur une même rivière et peut être très fort : au maximum 319 en septembre sur la Coise, 155 en août sur la Sénouire, 115 en octobre sur le Lignon du Velay, 92 en août sur la Dore à Giroux, 77 en août également sur l'Ance du Nord à Laprat (tableau n° 25). Ces valeurs doivent être considérées plus comme moyen de comparer une rivière à l'autre que comme expressions absolues car elles recèlent l'erreur attachée à la mesure des débits, ceux surtout des plus basses et des plus hautes eaux. C'est pour éviter ces erreurs d'échantillonnage que J. RODIER (1964) recommande, pour les modules, d'exclure les valeurs extrêmes en calculant avec l'*indice K 3* le rapport du dernier décile au premier décile des variables rangées dans l'ordre décroissant c'est-à-dire :

$$K\,3 = \frac{Q\ 90\ \%}{Q\ 10\ \%}$$

Cet indice, représentatif pour les modules dont la distribution est à peu près symétrique par rapport à la moyenne, est moins exact pour les débits mensuels (tableau n° 26). Néanmoins, il complète utilement le précédent sans le confirmer puisqu'il n'y a, le plus souvent, pas coïncidence entre les mois du plus fort rapport des moyennes extrêmes particulières $\frac{Q\ \text{mensuel max.}}{Q\ \text{mensuel min.}}$ et celui du plus fort indice $K\,3 \frac{Q\ 90\ \%}{Q\ 10\ \%}$ (tableau n° 27).

B. La confrontation des différents critères de variabilité conduit à deux **conclusions principales.**

D'une manière générale, les variations extrêmes du débit en un même mois peuvent atteindre des valeurs très fortes. Il est vrai qu'il s'agit ici de bassins de faible superficie sur lesquels tous les contrastes sont toujours très marqués mais les plus forts écarts ne caractérisent pas les plus petits bassins. Le rapport $\frac{Qm\ \text{max.}}{Qm\ \text{min.}}$ le plus fort en octobre sur le Lignon du Velay se manifeste à Pont-du-Lignon (115) et non au Chambon s/Lignon, en amont (82). La même remarque s'applique à la Loire elle-même où le rapport K 3 est égal à 9,4 en octobre à la station de Chadrac (1.315 km²) et atteint 18,2 à Villerest (6.520 km²) en octobre également.

Les plus fortes variations interannuelles des débits mensuels ne paraissent pas non plus liées aux excès méditerranéens puisque la Coise, la Sénouire, la Dore, l'Ance du Nord et la Sioule fort éloignée des Cévennes, se placent, avec des écarts maxima d'août et septembre, parmi

les rivières sur lesquelles les indices de variabilité sont les plus élevés (9).

Les indices sont les plus faibles sur l'Allanche où le rapport $\frac{Q \text{ mens. max.}}{Q \text{ mens. min.}}$ le plus fort est de 16 en décembre, la Couze Champeix (17,5 en novembre), la Loire à Chadrac (23,2 en octobre), la Couze Pavin à Saint-Floret (24 en juillet), le Lignon du Forez à Rory (26,5 en novembre), la Borne à Chadrac (36 en octobre) et la Loire à Bas-en-Basset (35,8 en juillet). Parmi les bassins que draînent ces rivières, quatre sont constitués en majorité de terrains basaltiques et, jusqu'à Bas-en-Basset, 27 % du bassin de la Loire sont des terrains volcaniques (cf. tableau nº 16 et fiches des bassins témoins) :

Allanche	94 % de basalte,
Couze Pavin	73 % de basalte,
Couze Champeix	40 % de basalte et 30 % de trachytes,
Borne	55 % de basalte.

Incontestablement, le rôle pondérateur des terrains perméables se manifeste dans la relative régularité des débits mensuels de ces quatre rivières. Mais cette influence n'est pas la seule : s'y ajoute celle de l'altitude, accompagnée de l'abondante alimentation pluviale également répartie tout le long de l'année. Les bassins du Lignon du Forez à Rory, des deux Couze et de l'Allanche sont les seuls parmi les vingt et un bassins témoins à connaître un maximum de pluie en décembre et un semestre de décembre à mai aussi arrosé que celui de juin à novembre.

(9) Il est difficile d'apprécier ces valeurs sans références à des rivières situées dans d'autres régions tempérées. Les suivantes permettent quelques comparaisons, limitées cependant, car les bassins ne sont pas de même superficie et les périodes étudiées n'ont pas la même longueur. M. PARDE, pour la Loire à Montjean (110.000 km² et 70 ans d'observations) et R. FRECAUT, pour la Moselle à Cochem (28.156 km² et 60 ans d'observations) donnent comme valeurs respectives du rapport des moyennes mensuelles extrêmes particulières :

	sur la Loire	sur la Moselle
décembre	29,8	22,5
janvier	14,5	11,7
février	19,3	14
juillet	10,3	13,3
août	11,8	9,3

Le débit de l'Oum er Rebia, soumise aux violences pluviométriques méditerranéennes d'automne mais pondérée par les influences karstiques dans les parties supérieure et moyenne de son bassin, peut varier au mois de décembre de 1 à 33, pour 32 années étudiées par J. LOUP (1960). Sur le Guadalquivir à Séville (57.000 km²), les moyennes particulières pour chaque mois varient de façon plus excessive. Le rapport des valeurs mensuelles extrêmes, pour la période de 19 ans, 1945-1963, a atteint **139** en octobre, 48,6 en mars, 46,9 en avril, 40,4 en février, 32,7 en novembre, 28,8 en janvier, 27 en mai, 14,3 en décembre, 14 en juillet, 12 en septembre, 11,3 en juin, **9,1** en août. cf. J.R. VANNEY (1970).

La seconde conclusion résulte de l'examen des variations interannuelles non seulement pour chaque mois mais pour des groupes de mois. Dans l'ensemble, les débits mensuels sont les moins différents d'une année à l'autre au cours du semestre de décembre à mai, celui où l'influence de la neige est la plus sensible ([10]), avec un maximum de régularité aux mois de janvier puis de février et mars (figure 17). Ce sont les mois où le débit moyen mensuel est le plus fort avec des coefficients mensuels de débit globaux supérieurs à 1. Au contraire, la plus grande irrégularité interannuelle affecte l'été et l'automne. Les débits d'octobre ou novembre sont presque partout les plus fantasques. Cependant, juin, juillet et août constituent une sorte de maximum secondaire de variabilité. Ce semestre de mai à décembre est celui de la plus grande abondance pluviale moyenne mais aussi l'époque de l'année où les pluies profitent au débit dans une proportion moindre en juillet, août et septembre à cause de l'élévation de la température. En outre, c'est aussi en été que le contraste thermique entre la plaine et la montagne s'accuse. L'écart entre les températures des stations les plus chaudes et celles des stations les moins chaudes peut atteindre, voire dépasser, 10° cependant qu'en hiver, les écarts entre les hautes et les basses terres sont assez réduits (P. ESTIENNE, 1956). L'altitude est donc un élément de différenciation des bassins, l'évapotranspiration étant en moyenne beaucoup plus élevée en été dans les parties basses.

Et pourtant, dans le détail, des exceptions apparaissent : celles de quatre bassins volcaniques et d'un bassin cristallin, lequel d'ailleurs est situé à une forte altitude moyenne (1.140 mètres) : l'Allanche, la Couze Chambon à Champeix, la Couze Pavin à Saint-Floret, la Borne à Chadrac, le Lignon du Forez à Rory, ont non seulement les indices de variabilité de valeurs les plus faibles et les plus homogènes tout au long de l'année mais le contraste entre les semestres y est à peine sensible.

III. LA RECHERCHE DES CAUSES DE LA VARIABILITE

Ces différences mêmes de la variabilité qui se manifestent aussi bien dans le temps que dans l'espace soulèvent le problème des causes.

Lorsque la variabilité est un caractère général du débit de toutes les rivières et que cette tendance s'affirme partout de mai à novembre, les causes n'en peuvent être que générales. En revanche, si deux rivières voisines ont des débits de variabilité très différente, d'évidence les causes n'en peuvent être que locales.

Dans le premier cas, celui des influences à grande échelle, seuls des mécanismes climatiques dépassant largement le cadre du climat local

([10]) cf. chapitre III, 1ère partie.

peuvent imposer le caractère fondamental de l'irrégularité. Dans le second cas, celui des influences à petite échelle, seules les diversités locales du substratum terrestre — altitude, exposition, pente, nature du terrain, volume des réserves, couverture végétale — peuvent moduler diversement l'irrégularité générale. En effet, les deux séries de causes générales et particulières interfèrent de sorte qu'en plusieurs cas, la variabilité semble exacerbée en certaines saisons et que, sur d'autres rivières, tout paraît contribuer, au contraire, à l'atténuer.

Dès lors que les causes particulières sont reconnues comme jouant un rôle modulateur des influences générales, celles-ci doivent retenir d'abord l'attention.

L'ensemble aérologique auquel appartient le bassin supérieur de la Loire est la partie méridionale de la zone tempérée où les saisons thermiques sont bien marquées, où circulent le plus fréquemment des perturbations dans le sens ouest-est, zone visitée épisodiquement par l'air froid des hautes latitudes ou envahie par le flux d'air chaud subtropical. L'allongement du bassin en latitude sur environ 350 km — entre 44°33′ au sud (limite entre le bassin de l'Allier et celui du Chassezac) et 47°42′ — à Gien introduit une nette différence entre les régions septentrionales à plus basse altitude, tournées vers le Bassin Parisien, et les régions méridionales qui sont aussi en moyenne les plus élevées.

En l'absence d'analyse détaillée des types de temps comme des types de pluies qui leur sont liés sur l'entier Massif Central et dont certains seront étudiés au chapitre des crues, plusieurs études fragmentaires permettent cependant de vérifier quelques interprétations sur les rapports de la circulation régionale et l'irrégularité des débits des rivières ([11]).

([11]) Outre l'étude statistique comparée de l'irrégularité des pluies mensuelles au Puy (45 ans) et à Clermont-Ferrand-Les Landais (85 ans), que nous avons faite en collaboration avec P. BOIS, les travaux suivants ont été les plus utiles à la présente recherche :

M. BILLAUT, P. BIROT, D. CAVALIER, P. PEDELABORDE (1956, pp. 15-39). M. BILLAUT y étudie la genèse des pluies en Aquitaine et dans l'ouest méditerranéen français (1947-1948-1949) et D. CAVALIER les pluies d'été de 1950 à 1954 à Lyon et à Marseille. Les auteurs y donnent notamment plusieurs exemples de la différence des situations isobariques au sol et en altitude. La pluie du 8 août 1947 à Perpignan, par exemple, s'explique par une instabilité en altitude alors que l'invasion froide de la perturbation de sud-ouest n'a pas atteint le sol.

P. PAUL (1969). La statistique des types de circulation établie par l'auteur, qui porte sur dix années seulement (1956-1967), est déjà très éclairante.

P. PEDELABORDE (1953, pages 401-417) et (1959).

P. PEDELABORDE et H. DELANNOY (1958, page 216). L'étude synoptique quotidienne pendant trois ans (1951-52-53) permet de pressentir les mécanismes essentiels du « climat pluviométrique » à l'extrême limite sud des « westerlies », et de préciser notamment le rôle aérologique de la Méditerranée.

P. PEDELABORDE (1957).

Par rapport au Bassin Parisien, le Massif Central et surtout sa partie méridionale se trouvent dans une position d'abri aérologique. Les trajectoires des courants perturbés d'ouest sont moins nombreuses, et, quand ces perturbations circulent le plus au sud (en hiver à cause de la translation de toute la zone des westerlies vers le sud), leur centre ne dépasse guère le parallèle de Paris (figure 18). Dès le Val de Loire, les flux d'ouest sont moins actifs que sur le Bassin Parisien : les souffles tièdes des secteurs chauds prédominent. D'après l'étude de P. PAUL, ils affectent 17 % des journées d'une année moyenne dans le Velay et le haut Vivarais, pour 31 % dans la région parisienne selon P. PEDELABORDE. Même si elles apportent le mauvais temps, ces perturbations d'ouest provoquent des averses nombreuses mais faibles. Elles sont d'autant plus faibles que les bassins doivent à leur situation intérieure dans le Massif d'être efficacement protégés par les lignes de relief les plus élevées, orientées du nord au sud : massifs des Monts Dore, du Cantal, de la Margeride, du haut Forez. De telles dégénérescences de perturbations océaniques sur le Velay sont illustrées par les situations des 1er au 3 août 1966, du 31 décembre 1966, du 25 août 1962, du 5 décembre 1965. Du tableau n° 17 peuvent être extraits les cas des bassins qui reçoivent le moins de précipitations (moins de 400 mm) pendant le semestre de décembre à mai, précisément le plus affecté par le régime d'ouest :

Bassins de	*P (en mm) de décembre à mai*
la Loire à Bas-en-Basset	331
la Sénouire à Paulhaguet	336
la Borne à Chadrac	339
la Seuge à Saugues	383
l'Allier à Vieille-Brioude	383
l'Ance du Nord à Laprat	393.

Ces bassins se trouvent tous sous le vent d'abris topographiques efficaces.

La position d'abri par rapport à la circulation polaire se manifeste encore par l'existence, en toutes saisons mais plus fréquemment en été et en automne (de mai à octobre), de situations anticycloniques qui, sans produire nécessairement un beau temps calme, peuvent aux parties de plus en plus méridionales du bassin valoir des flux d'air de saison chaude plus stables et plus lumineux qu'au nord (12).

A l'opposé, le même site du bassin en latitude l'expose à des courants perturbés de direction méridienne ou sub-méridienne, générateurs de

(12) L'altitude explique en partie le maintien sur le Massif Central d'une apophyse de l'anticyclone atlantique, l'air anticyclonique étant, dans la plupart des cas, de l'air polaire plus ou moins modifié et non de l'air subtropical.

types de temps violents, contrastés, caractérisés par une grande instabilité, de fortes variations de température et de fortes averses, parce que les échanges méridiens, dans ce cas, atteignent leur intensité maximale. La fréquence élevée, dans le Velay, de ces courants perturbés septentrionaux (N.W. - N.N.E.) qui affectent 22,2 % des journées d'une année moyenne, principalement au printemps et en été, et méridionaux (S.W. - S.S.E.), 18,4 %, principalement en automne, est un caractère dominant du climat du Massif Central. Ils ont toujours pour origine des invasions d'air froid polaire (langues superficielles de la basse troposphère, coulées froides ou gouttes froides en altitude) au sein d'un air généralement calme et habituellement tiède. Plus le contraste est accusé entre les masses d'air affrontées, plus les ascendances sont fortes et, par conséquent, plus les averses sont violentes. Ainsi, après une période de beau temps chaud anticyclonique en juillet 1966 (le 13 : 31°7 au Puy), l'arrivée d'une goutte froide au-dessus du Velay a provoqué un abaissement de la température (entre 6°9 et 11°2 le 18 juillet) et des précipitations, suivies, le lendemain, d'une crue à Bas-en-Basset. Le maximum de violence est atteint ici en automne quand les invasions froides pénètrent dans le bassin occidental de la Méditerranée, véritable réservoir d'air tiède et humide. Au printemps, les circulations méridiennes, plus fréquentes cependant qu'en automne, provoquent des averses moins considérables parce que, alors, les contrastes sont toujours moins accusés ([13]). Dans tous les cas, les invasions sont plus rares à basse latitude ; elles sont aussi plus perturbatrices.

La possibilité de situations météorologiques très différentes durant les mois de mai, juin, septembre, octobre et novembre, tantôt secs et stables, tantôt violemment et copieusement arrosés, explique qu'un même de ces mois puisse connaître une grande variabilité pluviométrique interannuelle qui ne manque pas d'imprimer aux débits leur caractère dominant d'irrégularité.

De son côté, le relief du Massif Central paraît jouer un rôle déterminant et de façons très diverses dans la répartition de cette variabilité hydrologique. Il semble mettre particulièrement en valeur les circulations méridiennes. Ainsi, la canalisation des coulées froides de N.W. et de N. dans les couloirs méridiens de la Loire et surtout de l'Allier provoque la convergence et accentue l'ascendance des masses d'air. Le relèvement

([13]) Les pluies sont moins abondantes qu'en automne d'abord parce que l'air est beaucoup plus frais donc plus sec. L'air est aussi beaucoup plus sec pour d'autres raisons supplémentaires : en mai, juin, l'évaporation au-dessus de la mer est à peu près nulle parce que la mer est plus fraîche que l'air à forte capacité hygrométrique qui la surmonte. Enfin, la température du substratum terrestre est plus élevée que la température de l'eau, d'où l'absence de l'effet de condensation du continent froid qui joue en automne et accroît les tranches de pluie.

cf. P. PEDELABORDE (1968a, pages 499-504) et (1957, planche L 100).

général de l'altitude au S.E. assure, à une large échelle, l'ascendance orographique et donc l'accroissement des précipitations. L'escarpe vivaraise et cévenole dominant de plus de 1.500 mètres les plaines méditerranéennes accuse les contrastes entre masses d'air différentes par flux perturbés de S.E. et accélère l'ascendance cyclonique : dans sa brusque ascension forcée, l'air méditerranéen saturé à la base (pendant l'été, même l'eau est plus chaude que l'air) devient particulièrement instable.

Enfin, l'orientation des dislocations principales crée des situations d'abri ou d'exposition aux vents pluvieux suivant les trajectoires des perturbations. La carte de la figure 18 souligne les unes et les autres. Les cassures E.O. dominent dans la partie sud et ne dépassent pas, au nord, la vallée du Lot ni les sources de la Loire : bastions de la Montagne Noire (1.200 mètres) et du plateau de Lacaune, Mont Lozère (1.700 mètres), blocs principaux des Cévennes disséqués par de courtes vallées parallèles orientées N.W. - S.E.. Au nord, au centre et à l'est, les accidents sont N.S. : bord du Massif le long de la vallée du Rhône, reliefs du Sancerrois, de la Combrailles (environ 400 mètres), limites des grands fossés tectoniques du centre et bordure occidentale du Morvan, alignement des bouches volcaniques de la chaîne des Puys. La direction varisque N.E. - S.W. oriente la limite sud-est du Massif Central au-dessus du Bas-Languedoc et détermine plus au nord les compartiments du Charolais et du Lyonnais. Enfin, dans le sud-ouest du Massif, les volumes montagneux prennent une orientation générale très nette N.W. - S.E., opposée aux dépressions originaires du S.W. : alignements Cantal-Aubrac (1.470 m), puis Mont-Dore (1.886 m), Cézallier, Margeride (1.500 m), faîte du Devès. Les hauts bassins de l'Allier, de la Dore, de la Loire, au cœur du Massif Central, sont abrités de toutes parts. Ils apparaissent aussi comme le pôle de l'irrégularité et de l'hétérogénéité.

Comment expliquer autrement que par les diversités morphologiques locales des variabilités de débits aussi différentes que celles qui affectent, par exemple, les rivières voisines du Lignon du Velay et de la Loire, de la Borne, de l'Ance du Nord, qui convergent de toutes les directions vers le « creux » du Puy et de Bas-en-Basset ?

CHAPITRE II

LES VARIATIONS SAISONNIERES DANS LE BASSIN DE LA LOIRE ET LE REGIME DU FLEUVE DE SA SOURCE A GIEN

La variabilité des débits suivant les mois et les lieux, trait dominant de l'hydrologie du haut bassin ligérien, fait de la définition des régimes une entreprise hérissée de difficultés. Ces difficultés inhérentes à l'imprévisible mobilité des phénomènes dont il s'agit de découvrir la nature profonde sont multipliées par l'hétérogénéité des résultats que donne la mise en œuvre des données disponibles.

Le crédit qui peut être accordé aux résultats est, en effet, proportionnel à la longueur de la période jalonnée par des relevés homogènes. Sur les quarante-huit stations considérées,

11 offrent des séries de 45 à 52 ans,
13 offrent des séries de 30 à 45 ans,
7 offrent des séries de 20 à 30 ans,
14 offrent des séries de 10 à 20 ans,
3 offrent des séries de 5 à 10 ans.

Lorsque la grille de renseignements est déjà si fragmentaire, si pauvre pour la fin recherchée, il n'est pas question de négliger l'information des séries courtes, surtout quand elles sont relatives à des rivières dont le comportement peut être déterminant en raison soit de leur situation dans le bassin, soit des grandes surfaces qu'elles drainent et donc de leur influence sur le débit du fleuve. Le chercheur se trouve ici, par force, dans la position du lion de la fable :

« Le monarque prudent et sage
« De ses moindres sujets sait tirer quelque usage... ».

Reste à savoir comment assembler des matériaux disparates dans un ensemble qui ne soit pas trompeur. Les éléments hétérogènes ne peuvent être fondus ensemble et doivent, de toute nécessité, rester juxtaposés, chacun à la place où il ajoute toute l'information dont il est porteur.

Les résultats se distribuent par stations de jaugeage, ce qui, d'emblée, suggère la représentation cartographique : la documentation disponible peut y être rassemblée par juxtaposition donc sans équivoque, sans

pourtant sacrifier la vue synthétique d'un réel ensemble dont il sera même loisible de faire varier le degré de rigueur en retenant ou en négligeant les stations trop jeunes et ce qu'elles ont mesuré.

I. L'EXPRESSION CARTOGRAPHIQUE DES HYDROLOGIES SAISONNIERES

A l'instar des conceptions de R. KELLER (1968) mises en œuvre notamment dans les deux cartes des régimes du Nil et des rivières de l'Europe Centrale, la représentation cartographique du régime ligérien se fonde sur les coefficients mensuels de débit rassemblés et classés dans les tableaux nº 28, 29 et 30. Sont figurés sur cette carte (figure 19, hors texte)

1) l'abondance moyenne annuelle par une bande suivant le cours de la rivière et d'une largeur proportionnelle au module,

2) les périodes de hautes et de basses eaux, et l'ampleur des variations de l'écoulement.

Comme fond de carte, alors que R. KELLER a représenté les huit types de régimes fluviaux définis par M. PARDE, c'est ici la pluviosité qui a été choisie. Ceci pour deux raisons. D'une part, les régimes fluviaux étudiés par KELLER sont, de fait, très divers et très tranchés alors que, dans le cas de la Loire, il s'agit moins de distinguer des types fondamentaux de régimes que des sous-types au sein d'un ou deux types hydrologiques. D'autre part, les cartes de R. KELLER ne représentent pas le régime des précipitations, qui n'entre pas dans son propos. En revanche, il est très utile ici de faire apparaître une donnée centrale relative aux précipitations, l'indice de concentration saisonnière des pluies, en même temps que le régime de l'écoulement. Cette comparaison est particulièrement requise lorsque, comme en l'espèce, de nombreuses rivières ne sont pas jaugées et que leurs comportements hydrologiques peuvent être plus ou moins éclairés par les renseignements pluviométriques.

A. Débits

L'ampleur des variations de l'écoulement et, par conséquent, l'immodération ou la pondération sont exprimées par des bandes de couleur de part et d'autre de la rivière : sur la rive droite, est porté l'écart du coefficient mensuel de débit correspondant aux plus hautes eaux moyennes mensuelles, sur la rive gauche, l'écart du coefficient mensuel de débit correspondant aux plus basses moyennes mensuelles.

La gradation harmonique des couleurs (toutes les nuances de l'arc-en-ciel, de violet à rouge) correspond au double classement imaginé par R. KELLER des coefficients mensuels de débit les plus forts et les plus faibles.

TABLEAU N° 31

CLASSEMENT DES COEFFICIENTS MENSUELS DE DEBIT D'APRES R. KELLER

coefficients les plus faibles < 1 *(rive gauche)*	*classes*	*coefficients les plus forts* > 1 *(rive droite)*
1 - 0,81	a violet A	1 - 1,19
0,80 - 0,71	b bleu B	1,20 - 1,39
0,70 - 0,61	c vert foncé C	1,40 - 1,59
0,60 - 0,51	d vert clair D	1,60 - 1,79
0,50 - 0,41	e jaune E	1,80 - 1,99
0,40 - 0,31	f orange F	2 - 2,19
0,30 - 0,21	g rouge G	2,20 - 2,39
$< 0,20$	h brun H	$> 2,40$

Ainsi, le tracé d'une rivière dont les écarts au delà et en deçà du module sont du même ordre, porte à droite et à gauche la même couleur ou des couleurs voisines, les plus faibles écarts étant figurés par les couleurs « froides » de l'arc-en-ciel (de violet à vert) et les plus forts par les couleurs « chaudes » (de jaune à brun) (1).

En outre, en chaque station, un « indicatif » résume les éléments principaux du régime. La Loire à Villerest, par exemple, dont le coefficient mensuel de débit le plus faible est de 0,25 (classe g) au mois d'août (huitième de l'année civile) et le coefficient mensuel de débit le plus fort de 1,55 (classe C) en mars (troisième de l'année civile) est signalée par g C - 8.3. Toutefois, il y a lieu de tenir compte que cette carte n'indique que les maximum et minimum principaux de l'année et donne une image simplifiée de tous les régimes. Dans le tableau n° 32, qui réunit les indicatifs de quarante-huit stations, sont portés les mois des maximum et minimum secondaires là où ils se manifestent. Pour que puisse être apprécié le degré de confiance à accorder à ce classement, la période d'observation est aussi rappelée dans ce même tableau et sur la carte de la figure 19. Enfin, les stations y sont énumérées dans l'ordre décroissant du rapport des moyennes mensuelles extrêmes, qui est un premier indice de l'ampleur des oscillations saisonnières.

Comme toujours en cartographie, l'extension dans l'espace de données

(1) Ces couleurs ont été utilisées ici, comme dans la carte d'Europe Centrale de R. KELLER, bien que toutes ne soient pas représentées, pour permettre une comparaison directe entre les deux régions.

ponctuelles (ici les valeurs se rapportant à une station de jaugeage) pose quelques problèmes. En quel lieu, par exemple, faut-il placer le point où, entre deux stations d'une même rivière, une classe de débit laisse place à une autre ? En principe, ce doit être à la confluence de la rivière dont l'apport est de conséquence sur la classe du débit considéré. En fait, quand on ne possède aucune donnée pour les affluents intermédiaires, le choix le plus circonspect comportera toujours un coefficient d'incertitude car les transitions sur une rivière ne sont jamais brutales comme pourraient le faire croire les séparations trop nettes, sur la carte, entre des secteurs aux régimes différents. C'est aussi pourquoi, plutôt que de donner une précision illusoire, il a été jugé préférable d'interrompre le tracé coloré sur certaines artères, comme la Sioule dont le cours inférieur pourrait avoir un régime assez différent de celui qui a été identifié et classé en amont, à Pont-du-Bouchet. Le degré de précision de la représentation est évidemment fonction de la densité des informations et c'est, avant tout, une impression d'ensemble que la carte cherche à donner.

B. **Pluies**

Quant au régime pluvial, il a été inscrit sur la carte en hachures qui expriment l'indice de concentration saisonnière des précipitations de CH. P. PEGUY, calculé en cent-vingt postes pluviométriques du bassin en amont de Gien, sur les moyennes globales soit de 1931-1960, soit de 1951-1970, soit sur les deux. Cet indice traduit la concentration des pluies au cours des trois mois consécutifs dont la somme des hauteurs d'eau moyenne est la plus forte.

Des douze classes qui peuvent en être théoriquement distinguées selon les quatre saisons (2), neuf seulement existent dans le bassin de la Loire. Leur répartition fait apparaître sur la carte quatre grandes provinces pluviales ainsi définies :

P p E e A A h
P e E A a H
E a

1° La majeure partie du bassin (hachures obliques) reçoit des pluies de saison chaude. C'est le domaine « continental » ou « médian » du Massif Central où la concentration pluviale atteint les valeurs les plus fortes, supérieures à 1,20, au fond des couloirs déprimés de la Loire et de l'Allier (1,55 dans la plaine du Forez, 1,69 à Clermont-Ferrand). Cependant, des variantes saisonnières partagent en deux ce grand domaine des pluies de saison chaude.

a) Sur une grande partie du Velay et à peu près tout le bassin de

(2) a H (déc.-janv.-fév.) h P p E e A
H (janv.-fév.-mars) P E A
H p (fév.-mars-avril) P e E a A h

l'Allier d'Alleyras-Poutès à Moulins, le maximum pluvial est printanier (P et P e). Le mois le plus arrosé est presque partout mai ou juin. Ainsi le bassin témoin de la Borne a pour indicatif pluvial : 1,28, a m J, soit P, et les mois les moins arrosés sont, en moyenne, janvier et février. Les courbes pluviométriques des bassins de la Sénouire, de l'Ance du Nord ou de la Dore à Giroux sont bien du même type (cf. fiches de bassin, tome II).

b) Sur une large bande de territoire qui correspond en gros à la vallée de la Loire non vellave, dans sa traversée du Forez, du Bourbonnais et du Nivernais, le régime pluviométrique est voisin du précédent (maximum de saison chaude) mais le maximum est plus tardif et décalé vers l'été et le début de l'automne (p E, E, E a). Le trimestre de concentration est

— juin, juillet, août (j j A) à St. Etienne, Balbigny, La Pacaudière, St. Yan, le Donjon ...
— juillet, août, septembre (j a S) à La Palisse, Chevagne ...
— août, septembre, octobre (A s o) à Moulins ...
— août, septembre, octobre (a S o) à La Guerche s/l'Aubois, Nevers, Léré ...

2° Un autre « régime » saisonnier des précipitations s'étend sur la partie nord-est du bassin, à peu près délimitée par la vallée de la Bourbince et celle de la Loire jusqu'à Gien. Les pluies y sont concentrées en novembre, décembre et janvier, soit A h, tandis que le printemps (avril, mai, juin) est en moyenne la saison la moins arrosée. Le haut Forez, du col de Noirétable à Saint-Anthême, ainsi que le versant oriental du Mont-Dore et le haut Cézallier sont aussi le plus arrosé en hiver (Anzat-le-Luguet : n D j) (cf. également, tome II, les fiches du haut Alagnon et de la Couze Pavin).

3° Enfin, la partie la plus méridionale du bassin est caractérisée par un maximum accentué d'automne (septembre, octobre, novembre) soit e A, ainsi qu'on l'observe sur le bassin de la Loire en amont de Rieutord ou encore à Mazan, à 1.329 mètres d'altitude, à la limite des bassins de la Loire, de l'Allier et de l'Ardèche. Cette abondance pluviale d'automne est incontestablement un trait « méditerranéen » du climat. Est-ce à dire que la courbe qui cerne, sur la carte, l'extrême sud du bassin limite exactement la zone d'influence méditerranéenne difficile à déterminer et dont l'extension est discutée ? [3] La sécheresse de l'été, autre trait

[3] Les critères choisis diffèrent suivant les auteurs : tantôt des moyennes portant sur les divers éléments du climat (rapport des pluies d'été aux pluies d'hiver, humidité relative du sol, inversion des températures, coefficient pluviométrique), tantôt des manifestations concrètes (type d'averses, aridité estivale, aspect de la végétation). A. BALDIT (1932), P. CARRIERE (1966), CAVALIER-BILLAUT-BIROT-PEDELABORDE (1956), A. COUTAGNE (1935), P. ESTIENNE (1956), L. GACHON (1946), A. MITARD (1927), H. ONDE (1923), M. PARDE (1927), G. STARON (1970).

singulier du climat cévenol, n'ayant pas été représentée mais le débit des rivières intégrant tous les éléments du climat, la superposition, sur la carte, des débits et des intensités pluviales saisonnières semble de nature à réduire les incertitudes sur la limite climatique dans cette région. Et les variations de l'écoulement suivant les saisons doivent apporter quelques lumières à la fois sur l'extension et sur la force des influences méditerranéennes dans le haut bassin de la Loire.

II. LA DEFINITION DES REGIMES SAISONNIERS

A. Traits généraux et thèmes majeurs de la définition des régimes

Ce que révèle au premier regard l'examen de la figure 19 est la *diversité,* trait saillant de l'hydrologie saisonnière dans tout le bassin de la Loire : variété dans les assemblages de couleurs deux à deux, disparités entre les régimes de la Loire et de l'Allier, changements d'amont en aval le long des deux grandes artères maîtresses, surtout sur la Loire où six classes de régime se succèdent de Rieutord à Gien.

Cette impression première est confirmée par des observations plus précises. Le rapport des moyennes mensuelles extrêmes qui résume bien les caractères d'immodération ou de pondération des débits varie de 2,7 à 15, ce qui signifie de fortes inégalités entre basses et hautes eaux pour les rivières où ce rapport est le plus fort : la Clamouze (15) et le Chapeauroux (10,9), l'Arroux (11,6), l'Allier (11,3 à Alleyras — 9,9 à Vieille-Brioude — 7,3 à Vic-Le-Comte), la Coise (8,1), la Loire à Nevers (7,4) et le Lignon du Velay à Versilhac (7,2), en limitant la liste aux valeurs supérieures à 7, relativement fortes pour des rivières coulant dans des régions tempérées océaniques. A l'autre extrême, au contraire, le Couzon et la Faye (2,7), la Sioule à Pontgibaud (3,2), le Lignon du Forez (3,5), la Dore (4,1) et les Couze (4 à Champeix et 4.3 à Saint-Floret), par exemple, font figure de rivières modérées.

Les plus médiocres coefficients mensuels de débit expriment la réelle indigence de certaines rivières (Clamouze, 0,11 — Allier à Alleyras, 0,15 — Chapeauroux, 0,15 — Loire à Gien, 0,20) tandis que, sur d'autres, il atteint à peu près la moitié du module (Faye, 0,51 — Sioule à Pontgibaud, 0,45 — ou Lignon-du-Forez, 0,48). Le coefficient mensuel le plus élevé est aussi très variable suivant les lieux, de 1,40 (Faye) à 2,21 (Le Verdier).

Une sur trois des rivières considérées a un régime simple, avec une seule alternance de hautes eaux et de basses eaux, mais le maximum peut se manifester soit en décembre (Arroux), soit en janvier (Aix, Besbre, Sioule, Faye), soit en février (Loire à Gien), soit en mars (Seuge, Ance

du Nord, Dore, Couze Chambon). Quand les phases hydrologiques sont au nombre de quatre (régimes complexes), plusieurs types de régime sont à distinguer suivant les mois des maxima principal et secondaire et les volumes relatifs de ces deux saisons d'abondance :

mois du		*Type* (1)	*C.M.D.*	
Maximum principal	*Maximum secondaire*		*Maximum principal*	*Maximum secondaire*
novembre	mars	Loire à Rieutord	1,90	1,65
décembre	mars	Coise à Moulin-Brûlé	1,72	1,62
décembre	avril	Sioule à Pontgibaud	1,43	1,37
janvier	avril	Besbre à Saint-Prix	1,56	1,36
mars	novembre	Loire à Chadrac	1,57	1,48
mars	décembre	Allier à Vieille-Brioude	1,73	1,39
avril	décembre	Lignon du Forez à Rory	1,63	1,29

(1) Dans une région de grande variabilité interannuelle des débits mensuels comme celle-ci, on peut s'interroger sur la valeur relative des deux maxima et se demander s'ils ne pourraient pas être inversés au cours d'un groupement différent d'années. A part la station de Rieutord où les observations ont commencé en 1954 seulement et où le maximum de novembre paraît être un trait stable du régime, les autres se réfèrent à une période globale toujours supérieure à vingt ans (Sioule à Pontgibaud : 22 ans, Coise : 29 ans, Besbre à Saint-Prix : 30 ans, Vieille-Brioude : 50 ans, Lignon du Forez à Rory : 50 ans, Loire à Chadrac : 52 ans).

Cette diversité s'inscrit néanmoins sur un fond de *caractères communs* à toutes les parties du bassin. Ainsi, que leur régime soit simple ou complexe, toutes les rivières connaissent deux saisons hydrologiques bien contrastées : celle de l'abondance au cours de la saison froide, et celle de la faiblesse estivale. Les coefficients mensuels de débit maximaux sont partout supérieurs à 1,40 et les plus faibles inférieurs à 0,70. Sur la carte n'apparaissent ni le violet ni le bleu, couleurs des faibles écarts de part et d'autre du module.

La période d'abondance est généralement plus longue que l'autre : en 80 % des stations étudiées, le débit de sept mois au moins reste supérieur au module et, dans ces valeurs globales hivernales, même quand un minimum secondaire se dessine, les débits supérieurs au module témoignent d'une abondance réelle. Mais cette abondance reste modérée puisque les coefficients hivernaux les plus forts n'atteignent pas 2 ou ne dépassent cette limite que sur l'Arroux (2,21) où la durée des observations (7 ans) est trop courte pour que, du petit nombre de données, soit induite une conclusion autre que provisoire et sujette à révision. Enfin, en dépit de la grande variabilité dans le temps du maximum hivernal

décelée dans les fréquences étudiées au précédent chapitre, c'est le mois de mars qui est le plus souvent (dans les deux tiers des cas) le mois des plus forts débits.

Les basses eaux de saison chaude sont un autre trait caractéristique des régimes d'un bout à l'autre du bassin, avec des écarts aux modules plus forts en moyenne que ceux des hautes eaux : cela est matérialisé sur la carte par la fréquence des couleurs brune et rouge en rive gauche des cours d'eau. A quatre exceptions près, dont trois sont le fait des rivières pour lesquelles la période d'observation est inférieure à dix ans (le Couzon, le haut Alagnon et la Dolore, les moins abondants en juillet), le mois d'août est celui du minimum en toutes les stations. C'est un fait constant dont les causes sont pourtant diverses. Ce minimum d'août est le plus prononcé dans l'extrême sud du bassin où la courbe des débits est à peu près parallèle à la courbe des pluies qui descend au point le plus bas à l'époque de la sécheresse « méditerranéenne » estivale. Il est aussi très marqué dans les régions où la pluviosité de saison chaude l'emporte sur celle de saison froide mais où l'évapotranspiration d'été, en raison de l'élévation de température, soustrait à l'écoulement la plus grande partie des précipitations. Enfin, toute une partie du bassin, des hauteurs du Morvan et du Charolais à la vallée de la Loire (figure 19), a un maximum de concentration des pluies à la fin de l'été et surtout en automne avec un minimum de printemps, voire d'été.

En bref, cette vision comparative d'ensemble des différents régimes dans le bassin de la Loire supérieure met en évidence

— une grande diversité,

— disciplinée pourtant par les influences qui imposent

- partout, le contraste des saisons hydrologiques,
- presque partout, les basses eaux du mois d'août, mais d'autant plus accentuées que la latitude est plus proche de la Méditerranée,
- et, dans deux cas sur trois, la tendance aux plus hautes eaux de mars.

Ces caractères essentiels dont la résultante est le régime de la Loire à Gien appellent donc une triple investigation :

— celle du maximum de mars, lié aux parts respectives, dans les débits de saison froide, de l'alimentation pluviale et de la fusion nivale,

— celle de l'extension des influences méditerranéennes,

— enfin, celle de la composition du régime de la Loire en conséquence des apports successifs d'affluents très divers.

B. L'influence de la neige sur les variations saisonnières

En amont de Gien, le bassin versant de la Loire développe près de la moitié de sa superficie au-dessus de 500 mètres d'altitude et 10 %

au-dessus de 1.000 mètres (4). L'influence de la neige ne peut donc pas a priori être mise en doute. C'est même, comme l'a justement relevé P. ESTIENNE, la puissance du manteau nival qui est l'un des indices de la rudesse hivernale dans le Massif Central. A égalité d'altitude, le Massif Central l'emporte nettement à cet égard sur les Alpes (5). Et comme les parties les plus élevées du bassin de la Loire sont aussi les plus arrosées et qu'en outre, les parties montagneuses les plus arrosées (Mont-Dore, Cézallier, Cantal, Forez, Morvan, Haut-Vivarais) ont en général un maximum de précipitations de saison froide (6), on peut même s'attendre que le rôle de la neige soit proportionnellement plus grand que ne le ferait supposer le seul profil hypsométrique du bassin. Le maximum de mars sur la majorité des rivières semble en être la confirmation : n'est-il pas logique de l'expliquer par la fonte des neiges au mois où le printemps commence ?

Or, contrairement à la conclusion que ces divers signes annoncent, le maximum moyen annuel à Gien, en cinquante et un ans, de 1918 à 1968, s'est produit le plus souvent en janvier, et, pour la période globale 1920-1960, le débit moyen normal a été le plus fort en février, ce qui incline à qualifier le régime de la Loire de purement « pluvial » et à conclure que la neige n'y joue qu'un rôle insignifiant.

C'est que, dans les régions montagneuses, la neige peut avoir deux effets très différents, tous les deux observables dans le Massif Central. D'une part, la rétention nivale implique un fléchissement des débits en hiver, et la fonte printanière un gonflement de mars ou, plus rarement, d'avril en des stations situées à 1.100 ou 1.200 mètres pour des rivières venant de 1.600 à 1.700 mètres. La condition en est, évidemment, que la couverture de neige soit assez tenace et épaisse pour immobiliser

(4) cf. première partie, chapitre I, tableau n° 1 et figure 2.

(5) « Le total de la neige calculé par BENEVENT pour la station du Tour est de 9 m 60 ; il constitue le record alpestre ; or les données du Puy-de-Dôme indiquent 8 m 40. Pour la longue période 1880-1949, malgré la sécheresse des dernières années, la moyenne du Puy-de-Dôme est 7 m 25. »

cf. P. ESTIENNE (1956, pages 49-61).

Les coefficients nivométriques relatifs (rapport de l'eau de fusion à la quantité totale des précipitations) sont de

0,44 au Puy-de-Dôme	(1.464 m)	pour la période 1880-1949,
0,42 au Mézenc	(1.535 m)	pour la période 1940-1949,
0,27 à Fay s/Lignon	(1.190 m)	pour la période 1940-1949,
0,25 au Monastier	(960 m)	pour la période 1940-1949,
0,22 à Sanssac	(860 m)	pour la période 1940-1949,
0,31 à Grèzes	(1.100 m)	pour la période 1940-1949,
0,17 à Saugues	(960 m)	pour la période 1940-1949,
0,24 à La Chaise-Dieu	(1.075 m)	pour la période 1940-1949,
0,40 à La Bérarde	(1.738 m)	pour la période 1940-1949,
0,20 à Villard-de-Lans	(1.025 m)	pour la période 1940-1949.

(6) cf. figure 19, et tableau n° 17.

pendant le temps nécessaire un volume d'eau tel que soit imprimé à la courbe des coefficients mensuels de débit un minimum hivernal prononcé.

D'autre part, quand le manteau nival est au contraire intermittent, interrompu par des redoux, et peut varier d'une année à l'autre ([7]), la lente fusion de la neige imbibe progressivement le sol pour peu que sa texture s'y prête, régularise les émergences et nourrit les débits. La relative régularité interannuelle des débits de janvier, février et mars est en grande partie la conséquence de ce second effet de la neige (tableaux n° 25 et 26). Cependant, il suffit dans les deux cas, mais surtout dans le second, d'une baisse des précipitations en janvier et février suivie d'une recrudescence même légère des pluies printanières, très efficaces sur un sous-sol gorgé d'eau, pour mettre en relief les débits de mars. D'après les courbes des moyennes globales de la Loire à Bas-en-Basset, de la Borne à Chadrac ou de l'Ance du Nord à Laprat, extraites des fiches de bassins-témoins, il est difficile de dire si le maximum de mars est davantage l'effet de la fusion nivale que de la recrudescence printanière des pluies ou inversement (figure 20).

L'examen comparé des pluies et des débits est le seul moyen d'apprécier les parts respectives de la fusion nivale et de l'apport pluvial. Le bilan ainsi dressé pour des années particulières est, certes, approximatif car la rétention n'est pas le seul fait de la neige ; une partie des précipitations, pluie ou neige fondue, peut être emmagasinée et restituée selon la capacité d'absorption du sol. Il reste que, si la pointe des débits en mars ou avril correspond toujours à une recrudescence des précipitations, il peut être admis que l'écoulement est plus déterminé par la pluie que par la neige. Le bassin du Lignon du Forez à Rory, élevé et copieusement arrosé en hiver (maximum de décembre), donc l'un des bassins-témoins les plus enneigés, fournit cependant des exemples de minima de février dûs à la sécheresse et non à la rétention nivale ([8]), suivis de maxima de mars ou avril causés par le retour d'abondantes précipitations pluviales. En revanche, lors de l'hiver particulièrement enneigé et rigoureux de 1950-1951 où la neige n'a pas quitté le sol pendant cinq mois au col proche de Noirétable, le gros maximum de mars (6,59 m^3/s de moyenne mensuelle, soit 57 $l/s/km^2$ ou 153 mm) s'explique d'abord et surtout par la fonte de la neige, accélérée, il est vrai, par des averses non négligeables (tableau n° 33 ci-contre).

Le rapprochement, pour le bassin de la Borne, des débits et des pluies moyennes mensuelles particulières au cours de la décennie 1956-

([7]) C'est le cas sur une grande partie du bassin (cf. 1ère partie, chapitre III) non seulement en moyenne montagne mais aussi dans les parties basses, zones particulièrement froides en hiver que sont les fossés de Limagne, de Roanne, d'Ambert ou le fond du bassin du Puy.

([8]) cf. 2ème partie, chapitre I, page 92.

TABLEAU N° 33

BILAN APPARENT A RORY — Lignon du Forez
HIVER 1950-1951

débits à Rory	*nov.*	*déc.*	*janv.*	*fév.*	*mars*	*avril*	*mai*
m³/s	*5,9*	*2,8*	*3,33*	*3,42*	*6,59*	*4,33*	*4,52*
l/s/km²	*51,5*	*24,4*	*29*	*29,7*	*57*	*37,7*	*39,2*
mm	133	65	78	72	153	98	105
précipitations (*mm*)							
Verrières (1)	204	40	46	96	78	45	149
Rory (1)	126	21	31	60	27	33	133

(1) Ces postes donnent des valeurs inférieures à celles des précipitations qu'a reçues effectivement le bassin. Mais les observations sont, à cette date, inexistantes au poste de Chalmazel et, en cet hiver précisément, les valeurs données pour le poste de Noirétable ont été obtenues par corrélation. La courbe de Verrières, un peu au sud du bassin, est assez représentative du rythme des précipitations qu'il faudrait à peu près majorer d'un tiers pour l'ensemble du bassin à Rory.

1965 révèle aussi quelques cas de rétention nivale (décembre 1956, décembre 1957) et de fusion en mars 1956, février 1957, janvier et février 1958, janvier et février 1961, mars 1962 (9). Mais, dans l'ensemble, les grandes fluctuations de février, mars ou avril sont en connexion étroite avec des précipitations abondantes au cours du même mois (février 1957, mars 1958, mars 1959, mars 1960), et même si l'eau a été précipitée en grande partie ou entièrement sous forme de neige, la fusion est néanmoins intervenue au cours du même mois. Sur ce bassin, il ne semble pas que la seule fonte de la neige suffise pour provoquer un gonflement très notable des débits en mars parce que le creux de janvier-février est très peu accentué. Les coefficients mensuels de débit sont de

1,35	1,43	1,32	1,36	1,47
novembre	décembre	janvier	février	mars

toujours supérieurs au module. Comme la courbe des pluies fléchit également en hiver, la neige paraît tout juste avoir pour effet (dans les moyennes globales) de modifier légèrement la courbe que donnerait sans elle le régime pluvial pur.

Sur l'Ance du Nord à Laprat et sur la Loire à Bas-en-Basset, dont

(9) cf. figure 21.
Les hauteurs de pluie portées sur le graphique sont celles de Sanssac, station la plus représentative du régime des pluies moyennes sur le bassin. En ordonnées, l'équivalence a été établie entre l'échelle des précipitations en mm, et celle du débit en m^3/s.

les bassins sont un peu plus élevés ([10]) et plus arrosés en hiver (en valeur absolue) que celui de la Borne, la double évolution des pluies et des débits est tout à fait comparable, avec une pointe de mars plus prononcée qui peut être l'indice d'une plus forte influence de la fusion nivale ([11]). Au total, pour la haute Loire jusqu'à Bas-en-Basset ([12]), le rôle de la neige est limité par l'indigence des précipitations plutôt que par les conditions thermiques : ainsi s'explique — l'irrégularité interannuelle étant, on l'a vu, de règle ici — que, lors d'hivers très humides, la neige puisse être très abondante et que, d'autres années, le manteau nival puisse être réduit à quelques centimètres seulement sur les hauts plateaux du Velay.

Pour évaluer la quantité de neige qui peut être retenue en année moyenne globale sur le bassin, *les bilans apparents mensuels* sont d'un grand intérêt. Ils permettent de connaître approximativement les coefficients mensuels d'écoulement (rapports, en chaque mois, des pluies écoulées aux pluies tombées $\frac{P'}{P}$) et les excédents d'écoulement accumulés à la fin de l'hiver ($P - (P' + ETP)$) ([13]). Ces excédents constituent la réserve, sous quelque forme qu'elle soit, réserve du sol ou neige. Quand le coefficient d'écoulement dépasse 0,90 ([14]), l'écoulement bénéficie, à coup sûr, de restitutions. Un coefficient très supérieur à 1 prouve ou bien que la capacité d'absorption du sol, donc la restitution, sont fortes, ou bien que la fonte de la neige est abondante, ou les deux à la fois. Mais quand le sol est saturé dès le mois de décembre ou incapable de retenir une forte quantité d'eau, l'excédent ne peut provenir aussi que de la fusion de la neige. Calculés pour tous les bassins-témoins, les

([10]) *Rivière*	*bassin versant*	*altitude moyenne*	*altitude maximale*
Borne	430 km²	940 m	1.423 m
Ance du Nord	354 km²	1.025 m	1.486 m
Loire	3.300 km²	965 m	1.753 m

([11]) Sur les trois bassins, le rapport du débit moyen de mars à celui de janvier est exactement le même (1,28). Cependant, le rapport du débit *médian* de mars à celui de janvier est plus fort sur la Loire :

1,48 à Bas-en-Basset,
1,33 sur la Borne,
1,25 sur l'Ance du Nord.

([12]) Le bassin de la Loire à Bas-en-Basset inclut ceux de la Borne et de l'Ance du Nord.

([13]) ETP est l'évapotranspiration potentielle qui a été calculée d'après la méthode de Thornthwaite et qui, en fait, pour les bassins élevés, peut être considérée comme insignifiante en novembre (de 10 à 15 mm) et nulle en décembre, janvier et février. Elle serait approximativement de 22 mm en mars pour le bassin de la Borne.

([14]) Même par saturation totale du sol, on peut admettre un reliquat minimum de 10 % soustrait au ruissellement.

cf. M. PARDE (1964), P. FONTAINE (1969).

coefficients d'écoulement apparents les plus forts (0,90 à 1,30) caractérisent les bassins les plus élevés et les plus arrosés (tableau n° 34). Presque partout, ils se manifestent en mars, excepté sur les bassins de la Couze Chambon à Champeix, sur le Lignon du Forez à Rory, sur la Loire à Rieutord où ils sont plus forts en avril et sur le bassin de la Sénouire à Paulhaguet où le coefficient le plus fort est en décembre (1,30), suivi de celui de mars (1,20).

Des trois bassins précédemment considérés, de la Loire à Bas-en-Basset, de la Borne à Chadrac et de l'Ance du Nord à Laprat, c'est la Loire qui, en mars, a le plus fort coefficient, 0,91, puis l'Ance, 0,87, puis la Borne, 0,69.

Est-ce l'effet, pour la Borne, d'une nivosité moins forte ou d'un volume de réserve en eau du sol supérieure du fait de la proportion de terrains basaltiques (55 %) et sédimentaires (12 %) qui composent son bassin ? L'examen des excédents d'écoulement ($P - (P' + ETP)$) révèle que, sur les trois bassins, la rétention cumulée augmente jusqu'au mois de mars puis commence à diminuer. Mais alors que, sur le bassin de la Loire, elle s'élève à 124 mm, ce qui est déjà faible, sur le bassin de l'Ance, elle est de 108 mm et, sur celui de la Borne, de 99 mm seulement. En supposant que la mise en réserve dans le sol soit la même sur les trois bassins, le rôle de la neige serait donc moins grand sur les débits de la Borne où la pointe de mars est précisément la moins prononcée.

L'examen de bilans sur le bassin de la Borne au cours d'hivers particuliers, météorologiquement différents, permet de faire quelques hypothèses sur les volumes d'eau respectifs mis en réserve dans le sol ou retenus par la neige.

Voici, par exemple, l'hiver pratiquement sans neige de 1924-1925. Après un mois d'octobre particulièrement pluvieux (124 mm et quotient d'écoulement $\frac{P'}{P} = 0{,}38$) suivi d'un mois de novembre assez bien arrosé (76 mm et quotient d'écoulement $\frac{P'}{P} = 0{,}61$), décembre et janvier reçoivent respectivement 11 mm et 4 mm. L'écoulement, pendant ces mois où l'évapotranspiration est très faible, est au total de 104 mm, presque entièrement issus, à raison de 89 mm (104 − 15), de la réserve du sol, qui, le mois suivant, va être reconstituée puisque, malgré les 37 mm de pluies de février ($\frac{P'}{P} = 0{,}32$), le débit moyen est plus bas en ce mois que lors du mois précédent. A la fin d'avril, les excédents d'écoulement — donc la réserve — s'élèveraient à 42 mm si l'évapotranspiration réelle était égale à l'ETP, et à 102 mm si l'évapotranspiration était nulle. La réalité est probablement plus proche de la première valeur extrême que de la seconde.

L'hiver 1950-1951 a laissé, au contraire, le souvenir d'un enneigement

exceptionnel, la neige n'ayant pratiquement pas quitté le sol du début de décembre à la fin du mois de mars à 1.220 mètres d'altitude (Issanlas), un peu au sud du bassin. Les 334 mm précipités de novembre à mars ont tout de même bien alimenté le débit de la Borne ($\frac{P'}{P} = 0{,}70$) qui atteint son maximum en février avec 11 m³/s ([15]), de sorte que l'excédent des précipitations sur les débits, à supposer que l'évapotranspiration ait été nulle depuis la fin de novembre, s'élevait à la fin de février à 96 mm seulement.

En 1962-1963, les précipitations furent moins abondantes qu'en 1950-1951 (262 mm au lieu de 334 mm) mais la température particulièrement rigoureuse explique que la réserve totale atteigne, fin mars, 134 mm. En attribuant à la réserve lithologique 90 mm, cela laisserait pour la neige 44 mm qui fondent en mars et avril ($\frac{P'}{P} = 0{,}88$ et $0{,}75$) emportés par les pluies abondantes en ces mêmes mois (mars : 65 mm et avril : 80 mm).

Les mêmes calculs effectués pour d'autres hivers très diversement enneigés montrent finalement que le débit hivernal de la Borne est bien plus influencé par la pluie que par la neige et que le sol serait, en moyenne, capable de distraire provisoirement à l'écoulement deux fois plus d'eau (90 mm) que le manteau nival moyen (au maximum 45 mm). L'eau de fonte passerait le plus souvent, non pas directement dans la rivière, mais indirectement, après infiltration dans le sol. Ce serait à peu près 10 mm sur 274 mm écoulés (module global) en année moyenne qui proviendraient de ce qu'on appelle la fusion nivale directe sur le bassin, soit 3,7 % du débit.

Si, aux bassins de l'Ance du Nord à Laprat et de la Loire à Bas-en-Basset, est attribuée la même capacité d'absorption de 90 mm ([16]), la rétention ou la fusion nivale moyenne serait de 18 mm sur le bassin de l'Ance, plus élevé et plus arrosé en hiver que celui de la Borne, soit 4,7 % du module global. Sur le bassin de la Loire à Bas-en-Basset, elle serait de 34 mm, soit 9,9 % du module global.

Sur l'Allier à Vieille-Brioude, le coefficient d'écoulement mensuel apparent est de 1,13 en mars alors qu'il est de 0,91 à Bas-en-Basset. L'influence de la neige sur le régime y est-elle plus marquée que pour la Loire ? Certes, le bassin est plus élevé ([17]) et sa configuration plus massive provoque, sur les bassins élémentaires, une fusion simultanée

([15]) La moyenne globale du mois de février est 3,75 m³/s.

([16]) Ce qui, comparativement à la Borne, est peu probable étant donné les configurations des bassins et la nature des terrains de couverture moins perméables et moins étendus que dans le bassin de la Borne.

([17]) 64 % du bassin de l'Allier à Vieille-Brioude se développent au-dessus de 1.000 mètres d'altitude et 40 % seulement du bassin de la Loire à Bas-en-Basset.

en mars ou avril ([18]). L'Allier à Lavalette, le Langouyrou, le Chapeauroux, la Seuge, la Sénouire ont tous un coefficient d'écoulement apparent élevé en mars précédé, en février, par un coefficient légèrement inférieur à ceux de décembre ou de janvier (tableau n° 34). Cependant, en moyenne globale, la rétention totale constituée à la fin du mois de février est notablement plus faible sur le haut bassin de l'Allier que sur celui de la Loire. Deux causes principales y concourent : une moindre capacité de réserve du sol (pentes plus fortes dans l'ensemble, terrains volcaniques moins nombreux) et, surtout, une pluviosité médiocre. En moyenne globale, en effet, dans le bassin de l'Allier, les deux mois de janvier et février reçoivent 15 % de précipitations en moins.

Il en résulte que la part de la fusion nivale représenterait une fraction plus faible du module global de l'Allier que de celui de la Loire mais que son influence, quand elle est présente, est plus concentrée en mars et en avril à cause des caractères topographiques et donc thermiques du bassin.

Dans les bassins élevés et les plus arrosés en hiver, l'influence de la neige est très nette sur les variations saisonnières du débit. Ainsi, sur la Couze de Pavin à Saint-Floret, au maximum des précipitations de décembre et janvier, suivi d'un minimum en février et mars, correspondent un minimum hivernal du débit de janvier et février et le maximum principal en mars et avril (cf. fiche de bassin de la Couze Pavin, tome II). L'excédent des précipitations sur les débits, par conséquent la mise en réserve totale, atteint ici la plus forte valeur : 225 mm. Sans doute, la capacité de mise en réserve des basaltes (73 % du bassin) est forte et les débits d'été bien nourris en août — le coefficient mensuel de débit est alors de 0,35 pour une moyenne globale de quarante-six ans et le débit spécifique de 7,6 l/s/km^2. Mais les précipitations d'hiver surtout sont très abondantes, 718 mm de décembre à mai, soit 53 % des pluies de l'année, et les débits honorables d'août ne sont pas seulement expliqués par les fortes réserves du sol puisque le minimum pluvial de juillet atteint tout de même 91 mm sur l'ensemble du bassin.

La comparaison avec la Couze voisine de Chambon permet d'avancer davantage dans l'analyse du phénomène. La réserve totale à la fin de mars y est de 100 mm au lieu de 225 mm et les débits spécifiques d'été un peu moins abondants (en août, 5,9 l/s/km^2 pour la Couze de Chambon et 7,6 l/s/km^2 pour la Couze de Pavin). Les basaltes faiblement représentés sur le bassin de la Couze de Chambon (13 %) ne sont pas la seule raison de ces différences car les précipitations sont, en outre, beaucoup moins abondantes : 501 mm de décembre à mai au lieu de

([18]) De fait, comme les radoucissements de la température sont, dans le bassin de la Loire, le plus souvent accompagnés de pluie, les crues de pure fusion nivale sont extrêmement rares et les crues mixtes peuvent se produire de novembre à mai (M. DACHARRY, 1966).

718 mm sur le bassin de la Couze de Pavin et 76 mm en juillet au lieu de 91 mm. Les deux rivières n'ont pas le même régime. Celui de la Couze de Pavin est complexe, pluvio-nival, avec maximum principal de mars-avril (c.m.d. : 1,50 et 1,51) et celui de la Couze Champeix est pluvial avec le maximum unique en janvier ([19]). L'exposition aux vents d'ouest du haut bassin de la Couze de Pavin et les conditions thermiques (altitudes moyennes respectives de 1.046 mètres et 946 mètres) ont certainement une influence plus sensible sur les débits par la rétention nivale que le sol n'en a sur les restitutions au cours de la saison chaude. Avec une réserve dans le sol de 100 mm, la fusion de la neige compterait pour 18,5 % du module global ; pour 150 mm de réserve, sa part serait encore de 11 %.

Le bassin de l'Alagnon en amont de Joursac ([20]), comme celui de la Couze de Pavin, est élevé, surtout basaltique (62 % de la superficie) et arrosé, l'hiver, de pluies abondantes quoiqu'un peu plus faibles (de décembre à mai, 615 mm contre 718 mm sur le bassin de la Couze de Pavin). Les régimes hydrologiques saisonniers y sont à peu près les mêmes avec deux maxima de saison froide séparés par un creux de janvier-février. Une petite différence cependant les distingue ([21]). L'Alagnon a son maximum principal en décembre et son maximum secondaire en mars alors que c'est l'inverse pour la Couze de Pavin. Sur le bassin de cette dernière, la réserve nivale est plus importante, proportionnelle en gros à la hauteur des précipitations, et la fusion à la fin de l'hiver gonfle davantage les débits que ceux de l'Alagnon puisque les hauteurs d'eau précipitée y sont supérieures. Les parts respectives de la fusion nivale dans les modules globaux des deux rivières seraient, en effet, de 18,5 % pour la Couze de Pavin et de 7 % pour l'Alagnon.

Parmi les bassins les plus arrosés, celui de la haute Sioule démontre bien l'exiguité du domaine où la fusion nivale réussit à marquer de son

---

([19]) Les durées d'observation qui ont servi à l'établissement des coefficients mensuels de débit du tableau n° 28, tome II, ne sont pas les mêmes pour les deux rivières : quarante-six ans pour la Couze de Pavin, trente-quatre ans pour la Couze de Chambon. Cependant, en réduisant la longueur de la série pour la Couze de Pavin aux trente-quatre mêmes années que pour la Couze de Chambon, la différence de régime subsiste avec légère avance de la pointe maximale sur la Couze de Pavin en février-mars au lieu de mars-avril, et baisse légère du coefficient d'août.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
34 ans	1,47	1,52	1,49	1,38	1,07	0,77	0,42	0,35	0,39	0,56	1,07	1,48
46 ans	1,46	1,42	1,50	1,51	1,10	0,74	0,43	0,38	0,43	0,57	1,10	1,40

([20]) 321 km² et 1.119 mètres d'altitude moyenne. La dénivellation maxima est de 1.020 mètres ; pour la Couze de Pavin, elle est de 1.247 mètres.

([21]) Quand on compare les deux rivières pour les mêmes années (17 ans : 1948-1952 et 1956-1968), la différence subsiste.

influence les variations saisonnières du débit ([22]). A Pontgibaud, le maximum secondaire d'avril est net, plus faible cependant que celui de décembre. Mais à Pont-du-Bouchet en aval, à la confluence de la Sioule et du Sioulet, le régime est pluvial avec maximum de janvier-février (c.m.d. : 1,52 et 1,51). L'influence de la neige s'y manifeste simplement en mars, à la fois par un maximum du coefficient d'écoulement mensuel apparent de 0,83 et une fréquence d'occurence du débit maximum égale à 21 %, presqu'aussi forte que celle de janvier, 23 % (tableau n° 21). Dès que l'altitude moyenne s'abaisse, l'influence nivale n'apparaît plus dans les débits moyens mensuels globaux ; elle n'est pas nulle pour autant.

Dans les régimes de grande variabilité interannuelle des débits mensuels, le seul examen des *débits moyens mensuels globaux* peut être trompeur s'il n'est pas assorti d'une étude des *fréquences* et des *coefficients d'écoulement apparent*. Dire, par exemple, que le régime est pluvio-nival seulement si le maximum annuel est retardé en mars, et définir comme pluviales toutes les rivières qui ont un maximum moyen « normal » de janvier ou de février, serait inexact. La Loire à Gien, pour la période de quarante ans 1921-1960, a un maximum de février, mais c'est en mars que le maximum a été le plus souvent atteint en années particulières. Les hauteurs d'eau observées à Briare par M. PARDE (1964 b) ont révélé que, pour les soixante années qui ont précédé cette période globale de 1921-1960, c'est-à-dire de 1861 à 1920, le maximum moyen global lui aussi se serait manifesté en mars-avril. Au contraire, l'adjonction des années les plus récentes fait nettement ressortir le mois de janvier ([23]).

L'influence nivale est certaine mais sa mesure n'est pas aisée. C'est là que l'examen des coefficients mensuels d'écoulement apparent est décisif. Ces coefficients, calculés à Gien pour la période de trente ans, de 1921 à 1950 ([24]), qui font apparaître un maximum de débit en février, prennent au cours de l'année les valeurs portées au tab. n° 35.

Le coefficient d'écoulement apparent de février est le plus fort mais

([22]) Deux stations, dans ce bassin, présentent les caractéristiques suivantes :

	bassin versant	*altitude moyenne*	*% des basaltes*
Pontgibaud	403 km²	916 mètres	32 %
Pont-du-Bouchet	1.170 km²	790 mètres	27 %

([23]) En effet, pour la période de 1919 à 1970 (52 ans), les fréquences des plus hautes eaux mensuelles particulières sont les suivantes, comparées aux fréquences de la période 1921-1960 (40 ans) :

	décembre	*janvier*	*février*	*mars*
1919-1970	20 %	17,5 %	17,5 %	20 %
1921-1960	17,3 %	21,2 %	17,3 %	15,4 %

([24]) Les pluies moyennes sur le bassin ont été calculées par planimétrage des cartes d'isohyètes moyennes mensuelles pour cette période.

celui de mars — très voisin — est supérieur à celui de janvier, mois où le débit brut global est pourtant plus fort qu'au mois de mars. C'est encore une preuve de l'empreinte nivale sur le régime. Toutefois, d'après la corrélation qui a pu être établie dans les pages précédentes entre le coefficient d'écoulement apparent et la puissance de la rétention nivale, le chiffre de 0,73 apparaît médiocre ([25]). Même dans les parties montagneuses du bassin, le minimum d'hiver est faiblement marqué et témoigne à la fois de faibles précipitations en cette saison et d'une médiocre rétention nivale. Le maximum de mars (rarement d'avril) combine, en réalité, la fusion nivale et le ruissellement pluvial favorisé par la saturation du sol (d'où le coefficient d'écoulement relativement élevé) et l'abondance, voire, en de nombreux bassins élémentaires, la recrudescence pluviale ([26]).

En conclusion, l'action de la neige est faible sur le régime à dominante pluviale de la Loire. Celui-ci, finalement, relève moins du régime montagnard à influence nivale que du régime pluvio-nival de plaine où règnent les tendances climatiques continentales, les grandes amplitudes thermiques annuelles, les pluies de saison chaude et la grande évapotranspiration d'été ([27]).

Au reste, les rôles respectifs de la neige et de la pluie dans les débits hivernaux constituent un aspect seulement de la définition des régimes ligériens, laquelle doit rendre compte d'autres caractères des débits. Des influences océaniques et méditerranéennes qui s'affrontent au-dessus du bassin, quelle est finalement la résultante dans le régime de la Loire ?

C. Les influences méditerranéennes dans les manifestations hydrologiques saisonnières

Le signe particulier qui distingue le régime méditerranéen de tous les autres régimes hydrologiques de la zone tempérée est que les variations saisonnières du débit dépendent essentiellement des pluies. Les variations thermiques saisonnières accentuent seulement les contrastes pluviaux car l'indigence des pluies d'été correspond aux températures les plus élevées et les fortes averses surviennent au cours des saisons froides. Quand ce

([25]) A titre de comparaison, sur la Saône à Auxonne (1886-1910) le coefficient d'écoulement apparent est de 0,63 en décembre, 0,73 en janvier, 0,98 en février, 0,73 en mars, 0,51 en avril. cf. M. PARDE (1964 a).

([26]) Sur l'ensemble du bassin en amont de Gien, les coefficients mensuels relatifs de pluie sont, pour les douze mois de l'année et pour la période 1921-1950 :

J	*F*	*M*	*A*	*M*	*J*	*J*	*A*	*S*	*O*	*N*	*D*
0,83	0,76	0,75	1	1,16	1,07	0,93	1,08	1,18	1,08	1,15	0,89

([27]) cf. les exemples de rivières d'Europe Centrale et des Etats-Unis cités par A. GUILCHER (1965, pages 349 et 350-356).

caractère disparaît, les régimes ne sont plus « méditerranéens ». Ils sont commandés par les variations saisonnières de la température.

Toutefois, la latitude, l'altitude, la proximité ou l'éloignement de l'océan composent tant de variantes régionales du climat méditerranéen dont il s'agit de déceler les effets dans les fluctuations mensuelles des débits de la Loire qu'il sied de savoir d'abord de quelle variante l'influence et les dégradations vont être étudiées ici.

A la lisière où confine au sud-est le bassin de la Loire, *le climat « cévenol »* est relativement humide et frais. L'altitude fait croître les précipitations dont la hauteur moyenne annuelle s'élève à

1.046 mm à Fay s/Lignon (Haute-Loire, 1.130 m d'altitude),
1.554 mm à Sagnes-et-Goudoulet (Ardèche, 1.230 m),
1.697 mm à Usclade et Rieutord (Ardèche, 1.130 m),
1.675 mm à Mazan (Ardèche, 1.329 m),
1.398 mm à Cros-de-Géorand (Ardèche, 1.020 m),
1.262 mm à St.-Etienne de Lugdarès (Ardèche, 1.080 m),
1.447 mm à La Bastide-Masméjean (Lozère, 1.043 m),
1.360 mm à Luc (Lozère, 980 m) [28].

Les températures subissent également l'influence de l'altitude : 5°3 de moyenne annuelle pour la période 1930-1949 à la maison forestière des Princes (commune de Sainte-Eulalie, Ardèche) (P. ESTIENNE, 1956), 6°1 à Issanlas et, en moyenne, plus de cent cinquante jours de gel par an aux stations les plus élevées de Cros-de-Géorand, Les Estables, Issanlas, les relevés portant respectivement sur six ans, huit ans et dix ans (P. PAUL, 1969). Ces traits relèvent du climat méditerranéen de montagne. L'altitude ne fait qu'atténuer, sans les modifier radicalement, les caractères spécifiques qui restent tout de même très sensibles dans la marche saisonnière du temps. L'automne est de beaucoup la saison la plus arrosée, celle où les averses atteignent leur maximum d'intensité, alternant avec des périodes prolongées de sécheresse. L'hiver n'offre pas, d'une année à l'autre, les mêmes caractères mais les précipitations, plus fréquentes qu'en automne, sont, globalement, moindres au point que, en cette saison, s'observe un fléchissement de la courbe pluviométrique annuelle. Les coups de froid qui favorisent la rétention nivale ne sont pas rares. La recrudescence printanière constitue un maximum secondaire très net mais, si les averses sont plus nombreuses qu'en automne, elles sont aussi moins violentes et leurs retours se prolongent souvent, avec la froidure, juqu'en mai ou juin où elles se tournent en orages.

Enfin, comme dans tous les pays méditerranéens, « l'aridité » estivale fait contraste avec les deux saisons qu'elle sépare, bien que la sécheresse

[28] cf. tableau n° 2, première partie, chapitre I, tome II : Liste des postes pluviométriques du bassin de la Loire et moyennes « globales » des pluies annuelles.

soit ici toute relative puisque juillet, le mois le moins arrosé, reçoit encore, du nord-est au sud-est :

49 mm de pluie à Fay s/Lignon,
43 mm de pluie à Sagnes-et-Goudoulet,
48 mm de pluie à Usclade et Rieutord,
56 mm de pluie à Mazan,
60 mm de pluie à Cros-de-Géorand,
56 mm de pluie à Saint-Etienne de Lugdarès,
52 mm de pluie à La Bastide-Masméjean.

Dans ces conditions, les conséquences hydrologiques des influences méditerranéennes posent deux délicats problèmes : d'une part, celui du passage du maximum pluvial de printemps, purement cévenol, à celui du régime pluvio-nival, océanique ou continental ; d'autre part, celui de l'origine des basses eaux d'été qui coïncident à la fois avec la sécheresse estivale méditerranéenne et surtout avec l'évapotranspiration maximale en été.

1. La solution peut en être d'abord cherchée dans la *double évolution des courbes de pluies et de débits* : l'influence des rythmes méditerranéens est indubitable si les deux courbes sont, dans l'ensemble, parallèles. De tous les bassins-témoins, celui de la Loire à Rieutord est le seul où cette corrélation existe : maximum principal de novembre, maximum secondaire de mars, minimum principal de juillet et fléchissement de février s'observent dans les débits comme dans les précipitations (cf. fiche de bassin de la Loire à Rieutord, tome II). La seule petite divergence dans ce parallélisme est due à la rétention nivale : en février, mars et avril, la lame d'eau écoulée est supérieure à la lame d'eau précipitée ([29]).

Sur plusieurs autres bassins, ceux

du Vernazon au Crouzet,
du Lignon à Chambon s/Lignon,
du Langouyrou à Langogne,
de l'Allier à Lavalette et à Alleyras,
du Chapeauroux à Chapeauroux,

le fort contraste pluvial entre le minimum d'été et le maximum principal d'automne, typiquement méditerranéen, se retrouve dans les courbes de débit mais le printemps, époque en moyenne de moindre pluviosité, devient la saison du maximum principal d'écoulement. Cette différence,

([29]) cf. coefficients d'écoulement apparents, tableau n° 34 :
février 1,05,
mars 1,14,
avril 1,28.
Sur ce bassin, la part de la neige dans les débits annuels serait de 6,3 %.

notamment entre les deux petits bassins de la Loire à Rieutord et du Vernazon au Crouzet, si proches (les deux stations sont distantes de 5 km) et à bien des égards comparables ([30]), montre combien les conditions orographiques sont déterminantes dans la propagation des influences méditerranéennes qui se manifestent à l'extrême lisière du bassin de la Loire. En cas de vents pluvieux du sud ou du sud-est, le haut bassin du fleuve et surtout de son affluent de rive gauche, la Padelle, y sont plus exposés, à l'avant du Massif du Mézenc, que le bassin du Vernazon doucement incliné vers l'ouest sous l'abri de sa ligne de faîte un peu plus basse (1.350 à 1.467 mètres) que les hauteurs du Tanargue (de 1.550 à 1.600 mètres) (figure 22). Très vite, à mesure que l'altitude s'abaisse, le gradient pluvial diminue sur les plateaux exposés au nord et à l'ouest comme en témoignent les valeurs suivantes de la pluie moyenne annuelle aux postes de

Mazan	1.675 mm	altitude : 1.329 m,
et Issanlas	1.249 mm	altitude : 1.220 m,
ou de		
Sagnes-et-Goudoulet	1.554 mm	altitude : 1.230 m,
et Lac d'Issarlès	1.170 mm	altitude : 1.035 m.

Leur altitude soumet aussi les deux bassins à l'action des vents d'ouest, ce qui leur vaut au total une forte alimentation pluviale annuelle et même des moyennes d'été qui ne sont point négligeables. Entre Mazan et Issanlas, distants d'environ dix kilomètres, la dégradation des caractères cévenols de la pluviométrie est rapide. Le rapport entre le maximum d'automne et le minimum de juillet est de 4,4 à Mazan et de 2,5 à Issanlas. Le maximum secondaire d'avril-mai s'affirme tandis qu'en automne, les coefficients mensuels relatifs de pluies diminuent.

Coefficients mensuels relatifs de précipitations à MAZAN et ISSANLAS

Moyennes 1951-1970	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Mazan	0,96	0,95	1	0,91	1,01	0,80	0,39	0,63	1,04	1,47	1,77	1,07
Issanlas	0,85	0,85	0,89	0,96	1,16	0,99	0,62	0,75	1,12	1,25	1,60	0,95

Enfin, la Gazeille qui, des pentes occidentales du Mézenc, coule vers l'ouest en direction du « creux » du Puy, n'a déjà plus, selon le critère utilisé, de caractère méditerranéen : la température est le facteur essentiel

([30]) cf. fiches de bassins, tome II. Malgré la brièveté de la période d'observation, la comparaison est rendue possible car les années considérées sont exactement les mêmes.

du régime hydrologique, non plus le régime pluviométrique (cf. fiche de bassin, tome II).

Un autre exemple de la dégradation rapide du régime cévenol est donné par le Lignon du Velay entre le Chambon et Pont-de-Lignon. A la première station, le régime est à peu près celui du Vernazon avec maximum principal de printemps, en avril. A la confluence avec la Loire, après avoir reçu la Dunières où la recrudescence automnale fait un palier sur le gonflement des débits de hautes eaux, au Pont-de-Lignon, la covariation de deux courbes de pluies et débits s'estompe. D'amont en aval, la modification progressive du régime pluviométrique est précisée par les valeurs suivantes du coefficient mensuel pluviométrique relatif aux différents pluviomètres du bassin.

Coefficients mensuels pluviométriques relatifs (1936-1965)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pont-de-Lignon	0,51	0,53	0,68	0,91	1,35	1,53	1,04	1,28	1,42	1,02	0,99	0,68
Pont-de-Faurie	0,79	0,80	0,84	0,94	1,14	1,19	0,88	1,11	1,23	1,02	1,04	0,93
Tence	0,66	0,71	0,80	0,97	1,20	1,26	0,80	1,07	1,34	1,20	0,99	0,90
Fay s/Lignon	0,89	0,92	0,95	0,99	1,11	0,92	0,55	0,82	1,19	1,28	1,08	1,22

Dans le bassin de l'Allier, le contraste cévenol entre été et automne et la dépendance où les pluies tiennent les débits ont plus d'empire. Cela est mis en pleine lumière par la *représentation cartographique* de la figure 19 : un seul couple de couleurs pour l'Allier jusqu'à Vieille-Brioude, des couples identiques ou ressemblant à celui de l'Allier pour presque tous ses affluents de rive gauche jusqu'à Alleyras forment une vive image d'homogénéité. L'exception du bassin du Langouyrou pour lequel les données portent sur quinze ans seulement pourrait être jugée négligeable ([31]) si cette disparité ne subsistait quand, pour toutes les rivières voisines, il n'est fait cas également que des mêmes quinze années d'observations. Ici encore, le fait s'explique par la situation du bassin : il se trouve légèrement abrité des vents du sud-est et du sud par la ligne de crête du massif de Mercoire où, sans doute, s'appuie aussi le haut bassin de l'Allier jusqu'à La Bastide mais en restant toujours exposé au sud. En amont d'Alleyras donc, la pluie moyenne sur le bassin (934 km²) a un régime encore cévenol avec minimum principal d'été et maximum de novembre, et la pluie commande l'opposition hydrologique entre les basses et les hautes eaux. Mais le total annuel des précipitations est, à

([31]) En effet, le coefficient mensuel de débit est de 0,21 en août. S'il était inférieur à 0,20, la coloration de la rive gauche serait marron comme sur les rivières voisines et non rouge.

altitude moyenne égale, moins élevé que sur la partie méridionale du bassin de la Loire ; la lame d'eau du trimestre de concentration est moins haute et le mois de juillet est plus sec. Du tableau n° 17 sont extraits les quelques exemples suivants :

Bassin	*Station*	*B.V. (km²)*	*altitude moyenne (m)*	*P annuelles (mm)*	*total du trimestre de concentration (mm)*	*p juillet (mm)*
Langouyrou	Langogne	66	1203	1070	358	51
Chapeauroux	Chapeauroux	384	1205	845	244	52
Allier	Lavalette	394	1158	1185	406	52
Loire	Rieutord	62	1290	1670	582	65
Vernazon	Le Crouzet	51	1230	1580	545	65

A coup sûr, les influences méditerranéennes pénètrent plus facilement et plus profondément dans le bassin de l'Allier que dans celui de la Loire à cause de l'abaissement, entre le Tanargue et le Lozère, du seuil de partage des eaux qui vont, d'un côté à l'Océan (Allier), de l'autre côté à la Méditerranée (Borne - Chassezac). L'immodération de l'Allier à Vieille-Brioude, par comparaison avec la Loire à Bas-en-Basset, en est, en grande partie, la conséquence. Cependant, une fois passé l'étranglement de la Bastide, l'effet de foehn se fait rapidement sentir dans la vallée de l'Allier : le gradient des précipitations diminue rapidement en année moyenne ([32]) et au cours même des averses cévenoles dont l'intensité s'atténue à mesure qu'elles progressent sur les hauts plateaux de la rive gauche et jusqu'au sud du Cézallier (J. CAROFF, 1964).

A Vieille-Brioude, cependant, où le régime de l'Allier est pratiquement le même qu'à la station d'Alleyras ([33]), les rythmes comparés des débits et de la pluie moyenne sur le bassin à l'amont de la station sont opposés et, au contraire d'Alleyras, la saison des maigres, l'été, est aussi la plus arrosée de l'année : les tendances continentales l'emportent désormais sur les influences méditerranéennes. D'ailleurs, sur la rive droite de l'Allier, la Sénouire est l'une des rivières les plus « continentales » du bassin. La zone de transition passe au sud de la Seuge et à mi-cours de l'Ance du Sud sur la rive gauche de l'Allier.

La limite climatique révélée par la carte représentant l'indice de

([32]) Ainsi La Bastide (1043 m) reçoit en moyenne 1447 mm par an,
Luc (980 m) reçoit en moyenne 1360 mm par an,
Langogne (927 m) reçoit en moyenne 941 mm par an.

([33]) cf. le tableau des coefficients mensuels de débit (n° 28) et les couleurs sur la carte de la figure 19.

concentration saisonnière des pluies est donc aussi celle des régimes hydrologiques propres à la frange méridionale des hauts bassins de la Loire et de l'Allier (figure 19). Sur le bassin de la Loire supérieure, l'influence cévenole est limitée à une bande étroite qui prend en écharpe les hauts bassins du Lignon, de la Loire et du Vernazon. Là, les pluies copieuses d'automne se manifestent avec violence mais, à cause de l'altitude de la crête vivaraise, les influences océaniques ne sont jamais absentes et les rivières coulant d'est en ouest sont, en moyenne, mieux alimentées toute l'année que dans le bassin de l'Allier. Sur celui-ci, abrité des effluves atlantiques derrière la ligne de hauteurs du Cantal et de la Margeride, la transition tarde davantage : le maximum de printemps prend le pas sur celui de l'automne, toujours moins arrosé que sur le bassin de la Loire, puis, insensiblement, le maximum pluvial de mars-avril fait place à celui de mai-juin.

2. L'examen de *la variabilité interannuelle des débits moyens mensuels* est un autre moyen de mesurer dans les débits moyens globaux la part exacte des influences méditerranéennes. Il est fondé sur le fait que, dans le régime le plus pur du secteur septentrional de la zone méditerranéenne, le maximum d'irrégularité interannuelle des débits mensuels se produit, évidemment, au mois d'octobre qui est tantôt très sec (prolongement de l'été) tantôt très arrosé (pluies d'automne). Au contraire, l'aridité estivale provoque, régulièrement chaque année, le retour des basses eaux, toujours très prononcées, si bien que l'indice d'irrégularité interannuelle est le plus faible en août ou en septembre. Les rapports des moyennes mensuelles extrêmes particulières du Guadalquivir en donnent un exemple : 139 en octobre, 9,1 en août (J.R. VANNEY, 1970). Le même fait est vérifié sur l'Oum er Rebia, dans le secteur méditerranéen méridional à maximum unique d'hiver : le même rapport des extrêmes en chaque mois atteint 33 en décembre, 3,4 en août et 3,5 en septembre (J. LOUP, 1960).

Dans le cas de la Loire, il ressort de cet indice d'irrégularité (tableau n° 25) ou de l'indice K 3 (tableau n° 26) que l'influence méditerranéenne est fortement dénaturée par l'altitude comme par les influences océaniques et continentales qui provoquent, à l'encontre des influences méditerranéennes, un maximum d'irrégularité interannuelle au cours des mois de l'été durant lesquels la pluviosité est à la fois très irrégulière et, en moyenne, la plus forte de l'année. Le rapport des moyennes mensuelles extrêmes a donc toujours des valeurs élevées en août, d'autant plus élevées que les influences continentales et atlantiques dominent. Alors que c'est en octobre ou en novembre qu'il atteint son maximum dans les bassins « méditerranéens » (tableau n° 25). L'exemple de la haute Sioule qui coule au nord-ouest des monts Dore et des monts Dôme comparée à la Loire à Chadrac près du Puy, illustre ces différences de régimes.

Rapport des moyennes mensuelles extrêmes particulières

Sioule à Pont-du-Bouchet	21	46	58	28	32	17	17
Loire à Chadrac	18	17	13	16	23	22	10
	juin	J	A	S	O	N	D

Toutefois, même sur la Loire à Chadrac, les valeurs de variabilité quoique d'évolution méditerranéenne avec maximum d'octobre-novembre, n'ont rien de comparable à celles des deux rivières typiquement méditerranéennes citées plus haut, Guadalquivir et Oum-er-Rebia. D'ailleurs, des dix-sept rivières où le rapport des moyennes mensuelles extrêmes particulières a été calculé sur le bassin de la Loire, les rivières les plus cévenoles ne sont pas celles où ce rapport est le plus fort mais la Coise et la Sénouire avec, respectivement, 319 en septembre sur la première et 155 en août sur la seconde.

Ces valeurs très fortes, surtout sur la Coise, ne sont sans doute pas absolument sûres en raison des erreurs qui peuvent fausser les évaluations de débits extrêmes sur des petits cours d'eau peu abondants ([34]). Telles qu'elles sont, elles expriment pourtant une tendance et un ordre de grandeur qui confirment l'interprétation proposée de la variabilité interannuelle des débits mensuels.

Il reste que, pour étudier avec précision, en fonction de ce nouveau critère, les deux cas du Lignon du Velay et du doublet constitué par la Loire à Bas-en-Basset et l'Allier à Vieille-Brioude, l'indice K 3, rapport du premier décile au dernier décile des débits mensuels particuliers, a été préféré au rapport des moyennes mensuelles extrêmes particulières.

Sur la même rivière, le Lignon du Velay, aux deux stations du Chambon s/Lignon (147 km²) et de Pont-de-Lignon (700 km²) ([35]), l'indice prend les valeurs suivantes :

	J	J	A	S	O
Le Chambon s/Lignon	8,6	9,6	**7,5**	14,7	**22**
Pont-de-Lignon	10,5	15	**10,2**	18,3	**21,5**

([34]) 176 km² de bassin-versant pour la Coise à Moulin-Brûlé et 1,59 m³/s de module global,

159 km² de bassin-versant pour la Sénouire à Paulhaguet et 1,89 m³/s de module global.

([35]) Les deux périodes de quarante ans au Chambon (1919-1950 et 1960-1967) et de quarante-deux ans au Pont-de-Lignon (1912-1953) ne se recouvrent pas exactement. Elles ont l'avantage cependant de comporter des années communes et de tenir compte de débits non influencés. Dans le cas du Pont-de-Lignon, la station a cessé d'être « exploitée » après les aménagements de Versilhac.

A l'aval comme à l'amont, l'irrégularité des débits d'octobre est exactement du même ordre. En revanche, aux mois de juin, juillet, août et septembre, la part grandissante des influences continentales au Pont-de-Lignon se traduit par un indice plus fort qu'à la station d'amont. Ce nouveau pas dans l'analyse montre — en se référant toujours à des moyennes mensuelles mais, ici, à leur fréquence — ce que ni les coefficients mensuels de débit globaux ni les courbes comparées des pluies et des débits n'avaient fait ressortir : à savoir que les excès méditerranéens du mois d'octobre restent aussi sensibles, en valeur absolue, à la confluence avec la Loire que dans la partie la plus « cévenole » du bassin. Ils sont estompés, en valeur relative seulement, par d'autres influences devenues prépondérantes.

Qu'en conclure sinon que les caractères cévenols ne se dégradent pas progressivement en se mêlant à d'autres. En fait ils dominent sur tout le bassin en alternance avec les autres influences : une année, ils prévalent du sud au nord et, une autre année, le climat n'a plus rien de méditerranéen en aucune partie du bassin. L'examen du régime pluviométrique d'années particulières pendant vingt-cinq ans en chaque poste pluviométrique montre effectivement qu'une homogénéité certaine règne sur le bassin et que la pluie moyenne reflète tantôt une tendance climatique, tantôt une autre : sur les vingt-cinq années examinées, treize ont été franchement « méditerranéennes » sur tout le bassin. C'est pourquoi le Lignon, en octobre, au Pont-de-Lignon, conserve la même irrégularité qu'en amont.

Dans le cas de la Loire et de l'Allier, une nouvelle fois rapprochés selon cet autre critère de la variabilité interannuelle des débits mensuels, les traits spécifiques de l'influence méditerrannéenne dans chacun des régimes ressortent avec netteté des données suivantes :

VALEURS MENSUELLES de K 3 $\frac{Q\ 90\ \%}{Q\ 10\ \%}$

extraites du tableau n° 26

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Allier à VIEILLE-BRIOUDE	4,7	4,7	4,7	7,9	7,8	8,4	6,5	**5,8**	6,5	**19,3**	10,8	6,1
Loire à BAS-EN-BASSET	4,4	3,7	4,5	6,6	5,2	7,4	5,4	**4,7**	7,1	**15,2**	8,8	4,2

Octobre, surtout, et novembre sont les mois les plus irréguliers. Et le coefficient d'irrégularité s'abaisse en août sur les deux rivières. L'Allier est, toute l'année, plus irrégulier que la Loire ; les contrastes méditerranéens des automnes successifs y sont plus sensibles que sur la Loire,

presque aussi marqués que sur le Lignon. Mais le bassin de la Loire est plus « méditerranéen » au cœur de l'été (août : 4,7) que celui de l'Allier (5,8). En avril, mai, juin, sur les deux bassins, une sorte de maximum secondaire d'irrégularité ne s'interprète plus comme un caractère proprement « cévenol » mais comme un trait commun à toute la zone méridionale des pays tempérés soumis, en cette saison, aux incursions fréquentes et intempestives d'air polaire.

En résumé de cette analyse des manifestations méditerranéennes dans les régimes des rivières issues de la crête cévenole, la première impression est donc que, dès l'origine, l'influence méditerranéenne est très dénaturée ([36]). Malgré cela, elle reste sensible jusqu'au cœur des régions dans lesquelles le climat pluviométrique moyen n'est plus du tout méditerranéen. Elle explique notamment l'irrégularité et l'abondance des débits moyens mensuels d'automne où les accès de fièvre sont cependant fort atténués. En été, l'influence méditerranéenne est certaine quoique difficile à identifier dans les débits qui semblent traduire davantage les effets de températures élevées que ceux de précipitations médiocres.

D. Les variations saisonnières à Gien

A ce point de l'enquête, l'explication des variations saisonnières de la Loire est encore incomplète. Dans son être déconcertant de mobilité et de diversité, deux dominantes s'étaient laissé saisir, les basses eaux du mois d'août et les hautes eaux de mars. De ces deux phénomènes, il a été rendu compte par des raisons qui, d'ailleurs, réduisent sans les exclure la portée des hypothèses de départ : fusion nivale et aridité méditerranéenne. Il reste encore à élucider comment les diversités si caractéristiques des composantes du bassin se fondent dans la résultante observable à Gien.

A cette fin, il est nécessaire de prendre une vue synoptique des phénomènes. C'est à ce besoin qu'a voulu répondre la figure 19. Elle ne saurait suffire cependant parce qu'elle rassemble des séries de données différant par l'âge en une région surtout où les débits moyens mensuels sont des plus irréguliers. Force a donc été de la compléter par les tableaux couvrant

— la période globale 1921-1960 (module à Gien : 345 m^3/s),

— les moyennes des quatorze années récentes 1955-1968 (module à Gien : 316 m^3/s), admises comme représentatives,

— l'année particulière 1961, « une année presque moyenne et sans excès, année de transition entre l'abondance de 1960 et la sécheresse de 1962 », pour l'ensemble de la France (J. de BEAUREGARD, 1961),

— l'année 1962 (module à Gien : 277 m^3/s),

([36]) cf., par exemple, les bassins du haut Lignon et du Vernazon.

— l'année 1968, particulièrement abondante à Gien (module : 433 m^3/s), qui a l'avantage de réunir les données de cinquante-deux stations de jaugeage.

La première remarque est que tous ces tableaux de situations si diverses font assez curieusement ressortir les mêmes tendances : sur tous, par exemple, apparaît la limite des influences méditerranéennes définie précédemment et qui marque le passage des régimes à deux maxima de printemps et d'automne au maximum unique de saison froide (décembre à avril). C'est donc qu'il existe, sous-jacente, une cohérence générale.

Il est même possible de discerner épisodiquement une véritable tendance à la covariation des flots élémentaires. Le maximum hivernal est le plus souvent le même d'un bout à l'autre du bassin. En 1961, février a été le mois du maximum secondaire en amont de Bas-en-Basset et de Vieille-Brioude, et du maximum principal jusqu'à Gien. En 1962, avril l'a emporté de Rieutord à Gien. Ce fut le mois d'un maximum secondaire aux seules stations de Lavalette sur le haut Allier et sur les rivières issues des monts Dore (Sioule et Couzes). Des exemples de tels faits pourraient être multipliés.

Un second caractère constant d'après les tableaux est l'évolution en sens contraires des régimes de la Loire et de l'Allier dont la figure 19 donne une bonne image. La Loire est toujours plus pondérée que l'Allier à ses sources du fait, principalement, d'une plus grande abondance des débits d'été. Puis les coefficients mensuels de débit d'août s'abaissent après la traversée des bassins du Puy, de l'Emblavès, de Bas-en-Basset et surtout du Forez, tandis que, sur l'Allier, ils s'élèvent régulièrement après les apports de l'Alagnon, des Couzes, de la Dore et de la Sioule : au Bec d'Allier, l'affluent est toujours plus pondéré que la Loire. Il semble que les pluies d'été, plus tardives sur le bassin de la Loire (E ou E a) que sur celui de l'Allier (P et P e), à peu près jusqu'au parallèle de Digoin, sont particulièrement inefficaces quand elles parviennent sur un sol vidé de ses réserves à la fin de la saison chaude, ce qui est le cas du bassin de la Loire. La Loire doit aussi au renforcement relatif de ses hautes eaux d'être plus irrégulière que l'Allier. Après le confluent de la Sioule, le bassin de l'Allier se retrécit en effet et l'apport des courts affluents ne se traduit que par un léger affaissement des étiages entre Moulins et la confluence. Au contraire, la Loire reçoit, après Digoin, plusieurs affluents dont les débits sont alimentés par des pluies abondantes en hiver. L'Arroux, notamment, et la Besbre sont souvent très pauvres en été. Mars, avril, mai, juin sont, sur le bassin de la Bourbince, par exemple, les mois du minimum pluvial ([37]). Tandis

([37]) Pour la période 1904-1963, les pluies moyennes mensuelles ont été de
83 78 **70** **60** **61** **63** 76 80 72 79 76 75 mm

que les débits d'hiver se renforcent donc dans la traversée du Bourbonnais et du Nivernais, les basses eaux ne se relèvent pas. Cette évolution est exprimée avec une forte éloquence dans le tableau suivant :

PERIODE GLOBALE 1955-1968

station	*rivière*	*rapport des moyennes mensuelles extrêmes*	*coefficient mensuel de débit*	
			le plus fort	*le plus faible*
Villerest	Loire	5,4	1,62	0,30
Digoin	Loire	5,5	1,66	0,30
Nevers	Loire	7,4	2	0,27
Pont-du-Guétin	Allier	5,8	1,81	0,31
Gien	Loire	6,7	1,95	0,29

Pendant un très grand nombre de jours, à savoir

132	en	1958,
300		1959,
207		1960,
128		1961,
162		1962,
138		1963,
228		1964,
46		1965,
113		1967,
106		1968,

le débit moyen journalier de l'Allier à Pont-du-Guétin a été supérieur en valeur absolue à celui de la Loire à Nevers malgré la différence de superficie des bassins versants.

Il en résulte un troisième caractère saillant : la Loire, après avoir collecté les flots réunis au Bec d'Allier, est, à Gien, d'une immodération chronique qui égale au moins celle de son cours supérieur. Le rapport des moyennes mensuelles extrêmes est plus élevé à Gien (6,5) qu'à Chadrac (6,1) pour la période de quarante ans 1921-1960, à peine inférieur (5,8 et 6,7) pour celle de quatorze ans 1955-1968, et deux fois sur trois très supérieur pour les années particulières

1961 : 10,8 à Chadrac et 27,7 à Gien,
1962 : 11,4 à Chadrac et 23,2 à Gien,
1968 : 11,9 à Chadrac et 10,1 à Gien.

Les hautes eaux sont modérément nourries sans que le maximum mensuel se détache très nettement et très régulièrement au cours du même mois parce que l'alimentation hivernale est complexe et irrégulière.

Le coefficient mensuel de débit le plus fort pour les deux périodes globales n'atteint pas 2. L'abondance est en quelque sorte limitée par la médiocrité des précipitations moyennes de l'hiver : le bassin entier de novembre à mai reçoit, en moyenne, moins de 400 mm de pluie (384 mm pour la période 1921-1950) et, ce, malgré l'apport, à partir de Digoin, des affluents de rive droite qui ont des hautes eaux abondantes en hiver. Les basses eaux restent médiocres sur l'artère principale d'un bout à l'autre du bassin bien que les causes n'en soient pas les mêmes mais leurs effets s'additionnent au milieu et à la fin de l'été.

En résumé, relevant dans son cours supérieur d'une complexité originelle de type pluvio-nival méditerranéen, la Loire présente à Gien un régime d'aspect simple, pluvial, très légèrement influencé par la neige. En fait, cette simplicité apparente masque des complexités qui apparaissent clairement dans les fréquences. Ces complexités ont leur cause autant dans les diversités successives des pays traversés que dans l'alternance d'influences climatiques qui règnent tour à tour sans partage sur la plus grande partie du bassin.

Ces alternances rendent compte de la cohérence relative qui se manifeste dans le débit moyen mensuel d'un bout à l'autre du bassin au cours d'années particulières.

Elles rendent compte également de l'extrême variabilité des débits d'une année à l'autre, laquelle de surcroît s'ajoute à l'irrégularité de l'alimentation pluviale dans toute la zone tempérée océanique.

C'est encore dans le même phénomène qu'il faut chercher l'origine et l'explication des étiages et des crues généralisés dont l'étude est indispensable à la définition complète du régime.

CHAPITRE III

BASSES EAUX ET ETIAGES

L'expression de Péguy est suggestive. Il est vrai qu'il existe un « double rivage » de la Loire : « Premier rivage en été, ou au cœur de l'hiver, premier rivage les grèves elles-mêmes, les grèves admirablement sinueuses ; c'est pour ainsi dire le rivage intérieur, le vêtement de dedans ; ce vêtement intérieur, ce rivage de dedans disparaît aux pluies, aux grandes crues d'automne et de printemps ; et deuxième rivage, dehors les grèves, rivage extérieur, vêtement de dehors, et de dessus, vêtement pour sortir et pour que la Loire aille dans le monde... » (1). Il est vrai qu'aucun autre fleuve français ne se réduit comme la Loire en été au « lin blanc et blond de ses grèves ». Il faut donc compter comme trait distinctif du « fleuve royal » la médiocrité générale en été des débits mensuels, médiocrité qui, dans la partie supérieure du bassin, va s'aggravant de Bas-en-Basset au Bec d'Allier.

Ces basses eaux estivales — mal chronique de la Loire moyenne — ont toujours nui à une bonne utilisation du fleuve. Elles compromettent aujourd'hui l'amélioration de l'agriculture (2), la croissance urbaine (3) et l'implantation d'industries avides d'eau (4). Aussi les grands projets d'aménagement hydraulique du bassin de la Loire ont-ils comme prin-

(1) De la situation faite au parti intellectuel dans le monde moderne devant les accidents de la gloire temporelle.
in Œuvres en prose (1898-1908), Bibliothèque de la Pléiade, page 1208.

(2) L'irrigation de complément dans la région de la Loire moyenne qui peut être considérée pourtant comme humide permet l'accroissement des rendements et surtout la régularisation de la production, nécessaire à une bonne commercialisation.
cf. M. LECARPENTIER et R. MONNEY (1961).
M. PARDE pense que la période de sécheresse de 1941-1942 à 1949 aurait réduit « les possibilités de subsistances autant et plus que ne l'a fait la guerre », cité par M. CHARTIER (1962).

(3) Les conséquences sociales et médicales de la rareté de l'eau et de sa pollution dans les campagnes et les villes du Nivernais jusqu'à la seconde guerre mondiale ont été étudiées avec force détails par G. THUILLIER (1968). L'étude historique donne la mesure des besoins actuels en eau des agglomérations ligériennes en rapide expansion.

(4) Particulièrement grosses consommatrices d'eau sont les centrales nucléaires dont deux sont déjà installées à Chinon et à Saint-Laurent-des-Eaux.

cipal objectif l'amélioration des débits d'étiage par des retenues effectuées en saisons pluvieuses dans les réservoirs construits à l'amont.

L'évaluation du volume d'eau issu, en été, du bassin supérieur du fleuve est d'une très grande complexité. D'abord, il n'est pas certain que les volumes jaugés à Gien représentent l'entier débit du bassin supérieur de la Loire. Les pertes et les résurgences entre le Bec d'Allier et le Bec du Cher posent encore, surtout à l'aval de Gien mais peut-être aussi en amont, de délicats problèmes qui appellent une étude particulière (5). Une autre source de difficulté réside dans l'instabilité du lit fluvial qui prive de signification, d'une date à l'autre, la valeur des cotes atteintes par les eaux les plus basses et donc les courbes de tarage en presque toutes les stations hydrométriques du Val, notamment Nevers, Pont-du-Guétin et Gien (6).

Enfin, si les quinze dernières années (1955-1970) — pour lesquelles la densité des observations permet de dresser des tableaux synoptiques de débits — sont, dans l'ensemble, représentatives des conditions « normales » de l'écoulement, il reste que, pour la saison de basses eaux, de mai à octobre, elles se sont révélées les moins fidèles (7).

Le but du présent chapitre est de contribuer à la connaissance aussi approchée que possible des rapports existant entre les conditions météorologiques et les bas débits, et surtout de l'influence qu'exerce sur les débits le complexe physique et pratiquement immuable du bassin versant quand les pluies sont minimes ou sans effet sur le débit.

I. CARACTERES DES TRES BASSES EAUX

A. La profondeur des étiages

Parce que les mesures de basses eaux sont rares et généralement incertaines, quelques valeurs, sinon strictement exactes, du moins très proches de la réalité, acquièrent beaucoup de prix.

Depuis que les hauteurs d'eau sont régulièrement observées sur la Loire moyenne, c'est-à-dire depuis cent cinquante ans au moins, il n'a jamais coulé aussi peu d'eau dans le Val qu'*au mois d'août 1949*. Cette année-là, les 6 et 24 août, deux jaugeages à Gien ont révélé avec les meilleures garanties d'exactitude un minimum exceptionnel de 11 m^3/s, soit 0,31 $l/s/km^2$. Lors des étiages antérieurs très célèbres de 1921 et 1870, le débit, à la station même de Gien, aurait été un peu plus abondant, de 15 à 20 m^3/s, soit entre 0,42 et 0,56 $l/s/km^2$. La Loire

(5) cf. ci-dessous 3ème partie, chapitre III.
(6) cf. 1ère partie, chapitre I.
(7) cf. 1ère partie, chapitre II.

se classe donc, à cet égard, parmi les rivières pluviales ou pluvio-nivales des régions tempérées dont les étiages extrêmes, selon M. PARDE (1949), varient de 0,2 à 1 l/s/km². Toutefois, dans cette catégorie, elle est des moins favorisées puisque ni la Seine à Paris ni la Saône à Lyon ni la Garonne au Mas d'Agenais ni la basse Moselle ni l'Ardèche, le plus « méditerranéen » des affluents du Rhône, ne semblent jamais être descendues aussi bas (8). Et, sur le cours même de la Loire moyenne, c'est en amont de Gien et en cette station que les débits spécifiques d'étiages extrêmes ont été les plus maigres au cours des trois grandes pénuries de 1870, 1921 et 1949. A Villerest, le débit spécifique, en 1949, fut encore plus bas qu'à Gien : 1,30 m³/s, soit 0,20 l/s/km². A Bas-en-Basset, en revanche, le minimum minimorum aurait été de 0,36 l/s/km², le 1er septembre 1919.

Malheureusement, à cause de l'instabilité du lit à Gien et malgré le nombre de jaugeages effectués en basses eaux, les évaluations de débits antérieurs à 1949 n'y offrent pas suffisamment de garantie pour constituer avec les chiffres les plus récents une série homogène de données. Aussi le classement des débits journaliers — si propre à caractériser les régimes et les étiages en particulier et à comparer des rivières différentes — ne peut-il porter à Gien que sur vingt années, de 1949 à 1968, période dont l'hydraulicité a été, dans l'ensemble, quelque peu inférieure à la moyenne (cf. figure 9).

Par un moyen détourné, il est possible de pallier les insuffisances des relevés à Gien. Entre Villerest et Montjean, en effet, seule *la station hydrométrique de Blois* offre à la fois le double avantage d'une échelle stable et de lectures régulières et prolongées. Les débits ont pu y être minutieusement calculés, vérifiés et classés pour une période de cent années, de 1863 à 1962 (M. PELLECUER et F. BARRIERE, 1963). Ils constituent une très utile référence pour l'étude des débits d'étiage à Gien bien qu'il ne soit pas question de transposer à Gien les chiffres publiés pour Blois. Certes, le bassin versant est, à Blois (38.182 km²), de 6 % seulement plus étendu qu'à Gien (35.890 km²) et les eaux infiltrées après Gien sont en totalité restituées avant Blois. Cependant, même s'il est admis que pertes et restitutions se compensent exactement, il est sûr que les eaux résurgentes atténuent notablement à Blois les irrégularités de débit, surtout précisément en été, saison où les eaux souterraines sont à l'abri des prélèvements de l'évapotranspiration très active sur les

(8) Pour la Saône et l'Ardèche, les valeurs portées dans le tableau n° 36 sont extraites de l'ouvrage de M. PARDE (1942).

cf. aussi, du même auteur, à propos du minimum minimorum de l'Ardèche : « Ce cours d'eau peut tomber très bas. Encore ai-je vite découvert que les minima spécifiques, à savoir 1 l/s/km², dépassaient nettement ceux de la Saône ou de la Seine qui passent pour pondérés à cause des calcaires et des sables... » (M. PARDE, 1950).

eaux superficielles. Mais, sur la fréquence et la durée des étiages, les données de Blois peuvent utilement être comparées à celles des stations d'amont les plus anciennement exploitées c'est-à-dire Villerest et Bas-en-Basset (9) sur la Loire, Vieille-Brioude sur l'Allier (10), Pont-du-Bouchet sur la Sioule et Giroux sur la Dore, où les séries de débits moyens journaliers sont continues depuis 1919.

Certes, les comparaisons entre des séries de valeurs relevées au cours de suites d'années différentes peuvent être fragiles. Cependant, dans le cas présent, les risques d'erreurs sont limités du fait que, par un heureux hasard, la période la plus courte, de 1949 à 1968 à Gien, comprend, en proportion à peu près équivalente, des années sèches, 1949 - 1950 - 1952 - 1961 - 1962 - 1964, où le débit journalier spécifique est descendu au dessous de 0,80 l/s/km², et des années humides, 1951 - 1956 - 1958 - 1963 - 1968, où le débit le plus bas a dépassé 2 l/s/km². A condition que soient mis en parallèle non les étiages extrêmes (11) mais les étiages caractéristiques, c'est-à-dire les débits au-dessous desquels les eaux tombent en moyenne dix jours par an (DC E ou DC 355 jours) (12), il est probable que les indigences respectives des différentes rivières du bassin se révèleront avec assez d'exactitude. En effet, l'étiage caractéristique varie peu d'une période de dix ou quinze ans à une suite de vingt-cinq, cinquante ou cent ans.

Les courbes des figures 23, 24 et 25 représentent les *débits journaliers classés* de Blois et des cinq stations fondamentales de Bas-en-Basset, Vieille-Brioude, Giroux, Pont-du-Bouchet et Gien. Y figurent aussi trois autres stations qui ont un double avantage. Le premier est qu'elles offrent à l'analyse des séries assez longues de débits journaliers : trente-huit ans

(9) On sait que, depuis l'été 1954, les débits bruts relevés à Bas et qui ont servi au classement des débits journaliers ne représentent plus les débits naturels de la Loire. La reconstitution des débits naturels, d'après les prélèvements de Montpezat, est impossible à l'échelle journalière. La correction est faite seulement à l'échelle mensuelle. Cependant, pour l'étude des basses eaux, le classement garde sa valeur puisque les bas débits d'été ne sont pas influencés par les aménagements d'amont, les prélèvements étant alors interrompus (cf. 1ère partie, page 45).

(10) A Vieille-Brioude, les plus bas débits sont probablement affectés par les aménagements d'Alleyras-Poutès en amont (Y. CORMARY, 1967). D'autre part, avant l'installation du limnigraphe en 1943, une erreur de lecture de + ou − 1 centimètre à l'échelle, en périodes de basses eaux, pouvait entraîner une erreur de 6 % sur l'évaluation des débits.

(11) En effet, quand les périodes d'observation sont disparates, les minimum minimorum des différentes stations peuvent n'avoir pas du tout la même signification : le plus bas débit journalier enregistré en un point aura, par exemple, une fréquence centenaire tandis qu'en un autre, la pénurie la plus grave pourra n'avoir qu'une fréquence décennale ou quinquennale.

(12) L'étiage caractéristique est le DC E relevé sur le nombre total de jours de la période considérée, non la moyenne des étiages caractéristiques des années particulières successives. Par exemple, le DC E en cent ans est le débit au-dessous duquel les eaux sont tombées pendant cent fois dix jours, soit mille jours.

à Saint-Floret, trente-cinq ans à Paulhaguet, vingt-trois ans à Pont-du-Vernet. Le second est qu'elles sont situées à l'issue de petits bassins proches par la taille mais très différents par les caractères géologiques et climatiques : le bassin de la Sénouire, par exemple, en amont de Paulhaguet, de la même superficie exactement que celui de l'Allanche à Pont-du-Vernet (159 km²), est constitué à 95 % de terrains cristallins alors que l'autre est presque entièrement basaltique (94 %) ; les régimes pluviaux et les tranches de précipitations moyennes annuelles sont différents sur les trois petits bassins, comme le montre le tableau suivant (cf. fiches de bassin de le Couze de Pavin, de la Sénouire et de l'Alagnon, tome II).

Bassin	*P annuelles*	*Indice de concentration* PEGUY
Sénouire	767 mm	m J j
Allanche	1.115 mm	n D j
Couze de Pavin	1.355 mm	D j f

Curieusement pourtant, les coefficients mensuels de débits d'août, mois le plus maigre sur les trois rivières, y sont du même ordre : 0,33 sur la Sénouire et l'Allanche, 0,35 sur la Couze de Pavin (tableau n° 30).

Pour rendre les onze courbes plus comparables entre elles, les débits caractéristiques n'ont pas été portés en valeurs brutes mais, pour chaque rivière, en valeur relative à son module : en ordonnées, l'échelle porte donc les « coefficients journaliers de débit ». De ces figures et des valeurs réunies dans le tableau n° 37 se dégagent plusieurs remarques.

La première est que la majorité des rivières étudiées sont plus pauvres en période de basses eaux que ne le sont, en moyenne, les cours d'eau de régimes pluvial et pluvio-nival océanique auxquels s'apparentent le plus la Loire et ses affluents. Pour ces catégories, les valeurs limites des coefficients caractéristiques, DC E, DC 11, DC 9, sont les suivantes :

		coefficients caractéristiques (d'après M. PARDE, 1949)		
		DC E	DC 11	DC 9
		module	*module*	*module*
régime pluvial-océanique	de	0,15	0,25	0,35
	à	0,25	0,35	0,45
régime pluvio-nival océanique	de	0,08	0,15	0,30
	à	0,16	0,25	0,40

Or, à Gien, ces mêmes rapports sont respectivement de 0,10, 0,147 et 0,39. L'Allier à Vieille-Brioude, la Loire à Bas-en-Basset et à Villerest, la Sénouire à Paulhaguet, la Dore à Giroux montrent, dans leurs DC 11 et DC E (< 1 l/s/km²) des pénuries qui évoquent celles des rivières typiquement méditerranéennes. Pourtant, les basses eaux ne sont pas assez prolongées pour abaisser le débit médian (DC 6) à moins de 57 % du module alors que, sur les rivières méditerranéennes, ce débit médian atteint au maximum la moitié du module.

La seconde remarque est que, malgré la faiblesse de leurs coefficients journaliers de débit, trois rivières connaissent des étiages nettement plus abondants que les autres :

	DC E *(l/s/km²)*	DC 11 *(l/s/km²)*
l'Allanche à Pont-du-Vernet	1,25	3,8
la Couze de Pavin à St. Floret	0,91	4,5
la Sioule à Pont-du-Bouchet	1,37	2,14.

Elles les doivent à plusieurs causes dont celle qui vient d'abord à l'esprit est la nature du sol, au moins pour les deux premières qui drainent des bassins où les basaltes généralement aptes à retenir les eaux infiltrées sont relativement abondants (Allanche : 94 % du bassin, Couze de Pavin : 73 %, Sioule : 27 %). Mais ces bassins sont aussi parmi les plus arrosés et ils le sont copieusement, en hiver, par la neige. Comme, en saison froide, l'imbibition des terrains est facilitée par la rétention nivale, les conditions sont donc réunies pour que la réserve souterraine relativement bien nourrie alimente les débits lors des maigres. Car il importe finalement assez peu, pour le soutien des étiages, qu'une épaisse couche d'altérites ou des terrains poreux occupent de larges superficies et offrent de grandes capacités de réserve si ces citernes naturelles restent vides. Les influences respectives de l'abondance pluviale et de la richesse des réserves souterraines sont, par conséquent, du plus grand intérêt pour la prévision des débits extrêmes d'étiage. Elles peuvent être évaluées à la faveur seulement du tarissement des rivières examiné dans la suite de ce chapitre.

Mais, troisième remarque, les courbes de débits classés renseignent déjà utilement sur les risques de défaillances sévères. Du DC E au minimum connu, la chute est rapide pour toutes les rivières. Même l'Allanche et la Couze de Pavin ne sont pas à l'abri d'accès de faiblesse profonde (figure 25). Les rapports du débit caractéristique d'étiage au minimum extrême sont de 2,5 pour l'Allanche et de 3,5 pour la Couze, valeurs certes largement dépassées par la Sénouire (12), la Dore (10), l'Allier à Vieille-Brioude (8,5) ou la Sioule (4), mais qui révèlent que le rôle de la réserve souterraine dans ces bassins est tout de même limité en cas de sécheresse durable (tableau n° 38). En effet, les valeurs de ce

rapport supérieures à 2 sont, en général, la preuve soit de fortes irrégularités climatiques comme dans le domaine méditerrannéen soit d'une faible rétention du sol à cause de la nature imperméable des terrains ou de fortes pentes contraires à l'infiltration ([13]). Et ces chiffres sont d'autant plus forts que les eaux non soutenues par des réserves abondantes baissent rapidement en l'absence de pluie. A Bas-en-Basset, sur la Loire, le rapport $\frac{DC\ E}{\text{minimum connu}}$ est de 3,17, à Villerest de 3,25 et à Gien de 2,81. Sortie du domaine montagnard et cristallin, la Loire n'a guère amélioré la tenue de ses étiages, toujours sujets à de profondes dépressions.

B. **Date des étiages les plus fréquents et les plus faibles**

A Blois, d'après l'étude de M. PELLECUER et F. BARRIERE, le relevé pendant cent ans, tant des débits journaliers minima que des plus faibles moyennes mobiles de vingt et trente jours consécutifs, fait apparaître que, en fonction des fréquences, le mois des étiages est septembre, non pas août durant lequel pourtant se manifestent les plus basses eaux moyennes annuelles. En outre, les étiages y sont sans conteste plus fréquents en octobre qu'en juillet bien que le débit moyen mensuel d'octobre (227 m^3/s) soit de 13,5 % supérieur à celui de juillet (167 m^3/s) ([14]). De ces faits, l'évolution des débits mensuels médians donne une meilleure idée que les valeurs moyennes mensuelles ([15]). Sur la courbe des débits médians, le creux de l'été est, en effet, non seulement déporté à droite de celui qui s'inscrit sur la courbe des débits moyens « normaux » mais il est aussi plus profond. Le débit médian de juillet (137 m^3/s) est à peine inférieur à celui d'octobre (140 m^3/s) mais, en ce dernier mois, le fort écart entre le débit médian et le débit moyen $\left(\frac{Qm\ médian}{Qm\ moyen} = 0{,}62\right)$ montre bien que la probabilité

([13]) M. PARDE (1942) donne comme valeur de ce rapport : 2,5 pour l'Ardèche, 2,40 pour la Saône à Lyon, 2,30 pour la Durance « défavorisée par les sécheresses méditerranéennes ».

([14]) Les débits journaliers minima et les moyennes de vingt et trente jours consécutifs les plus faibles se répartissent ainsi dans l'année :

	M	*J*	*J*	*A*	*S*	*O*	*N*
Qj minimum		4 %	4 %	35 %	40 %	17 %	
Q 20	1 %	2 %	5 %	36 %	38 %	18 %	
Q 30	1 %	3 %	7 %	32 %	39 %	17 %	1 %

cf. M. PELLECUER et F. BARRIERE (1963).

([15]) cf. tableau n° 39 et figure 26. Pour rendre plus comparables ces courbes se rapportant à des stations dont les débits bruts sont fort différents, ce sont les débits spécifiques mensuels, en $l/s/km^2$, qui ont été portés en ordonnées.

de bas débits est plus forte à la fin qu'au début de la saison des maigres.

En aucune des dix-sept stations hydrologiques d'amont, réunies dans le tableau n° 39, la priorité de septembre pour les étiages ne se manifeste comme à Blois. Août est partout le mois des minima mensuels moyens et médians. Et, seule, la station de Giroux sur la Dore enregistre un débit médian d'octobre (3,9 m^3/s) inférieur à celui de juillet (4,5 m^3/s). Pourtant, la courbe des débits mensuels médians s'éloigne fortement de celle des débits moyens, surtout à l'issue des bassins abrités et peu arrosés pendant la saison froide, à Moulin-Brûlé (Coise), à Pont-du-Lignon, à Paulhaguet (Sénouire), à Villerest, Chadrac (Borne), Bas-en-Basset ou Giroux (Dore) (figure 26). A Pont-du-Lignon, par exemple, un an sur deux, le débit du mois de juin est à peine supérieur (56 %) à la moitié du débit moyen global et les débits médians de septembre et d'octobre atteignent seulement 48 % et 38 % des débits moyens de ces mêmes mois.

Sur le cours même de la Loire vellave et forézienne, la période des pénuries estivales s'allonge régulièrement en même temps que les débits spécifiques mensuels s'appauvrissent. La comparaison, au cours des même cinquante ans, de ces valeurs à Chadrac (1.312 km^2), à Bas-en-Basset (3.300 km^2) et à Villerest (6.520 km^2) en administre la preuve (tableau n° 40).

Aux mois de septembre et d'octobre, les risques de bas débits sont plus grands à Villerest qu'à Chadrac.

La fréquence des basses eaux en chaque mois permet de vérifier que les étiages sont le plus régulièrement concentrés au cœur de l'été dans la partie la plus méridionale donc la plus méditerranéenne du bassin supérieur, et qu'à l'aval, en revanche, les basses eaux annuelles peuvent survenir au cours d'une période plus longue, d'avril à décembre pour la Sioule à Pont-du-Bouchet par exemple. Sur la figure 27 qui résume, pour quatre stations, Vieille-Brioude (Allier), Villerest (Loire), Giroux (Dore) et Pont-du-Bouchet (Sioule), l'inventaire des jours où les eaux se sont tenues au dessous du DC 11 global de cinquante ans, les histogrammes de fréquences mensuelles sont diversement étalés. La prédominance d'août pour les débits inférieurs au DC 11 moyen se manifeste partout mais elle est la plus prononcée à Vieille-Brioude. En moyenne, le mois d'août y compte chaque année 12,7 jours où le débit est inférieur au DC 11 moyen, le mois de septembre 9,5 jours et le mois d'octobre 2,8 jours. A Pont-du-Bouchet, les trente et un jours par an qui sont inférieurs au DC 11 — exactement le même nombre qu'à Vieille-Brioude — sont autrement répartis : 10,7 en août, 6,8 en septembre, 5,2 en octobre (tableau n° 41).

La réalité des étiages est encore mieux saisie dans le relevé, en chaque année particulière, des dix jours consécutifs où le débit a été le plus

faible ([16]). Aux mêmes quatre stations de Vieille-Brioude, Villerest, Giroux et Pont-du-Bouchet, prises en références, ces maigres annuels sont apparus au cours des différents mois avec les fréquences inscrites au tableau n° 42.

C'est entre le 15 juillet et le 15 septembre qu'aux quatre stations, surviennent le plus souvent les débits annuels les plus faibles mais l'Allier à Vieille-Brioude et, à un degré moindre, la Loire à Villerest se distinguent par une plus forte concentration de ces situations du 15 août au 15 septembre alors que la Dore et surtout la Sioule ont, en moyenne, des étiages plus précoces.

En l'absence, entre Villerest et Blois, de stations aussi anciennes que les précédentes, qui permettraient de suivre l'évolution des étiages sur le cours de la Loire, on peut tout de même constater que l'allongement de la saison des étiages, bien marqué déjà à Villerest, ne fait que s'accentuer sur la Loire dans sa traversée du Bourbonnais et du Nivernais. A Blois et probablement dès Gien, le décalage est net entre le mois d'août qui présente le minimum des moyennes mensuelles globales et le mois de septembre où se manifestent le plus fréquemment les étiages particuliers. Le rapprochement des valeurs du tableau n° 42 met clairement le fait en évidence.

Si, dans le haut bassin de la Loire, les étiages apparaissent comme une exagération des basses eaux ordinaires et si, par conséquent, les valeurs mensuelles particulières sont très représentatives des maigres annuels, la corrélation est de moins en moins vérifiée à l'aval. Au delà du Bec d'Allier, les étiages du fleuve intègrent une multitude de situations particulières et régionales dont les influences respectives sont plus faciles à mesurer dans l'examen simultané d'un grand nombre d'affluents lors de graves pénuries que dans une vue de chaque artère isolée du bassin.

C. Description des étiages récents les plus sévères

1. *Classement des étiages à Blois et à Gien*

Les étiages sont difficiles à comparer et à classer parce qu'ils se présentent avec plusieurs caractères (DC E, minima atteints des débits bruts et des débits spécifiques, durée des débits inférieurs à des valeurs significatives, averses interruptives ou non) et que leur gravité doit être appréciée préférentiellement en fonction tantôt d'un caractère, tantôt de

([16]) Ce n'est pas exactement le DC E car les dix jours de plus faible débit annuel ne sont pas toujours consécutifs. Il peut y avoir deux ou trois périodes de bas débits dans l'année. Quelquefois aussi, le débit reste constant avec une valeur très faible pendant plus de dix jours. A Blois, MM. PELLECUER et BARRIERE ont constaté que les plus faibles moyennes mobiles de vingt jours consécutifs de débits journaliers sont souvent très voisines des DC E particuliers quand elles ne se confondent pas avec eux.

l'autre sans qu'il soit possible de donner du phénomène une expression synthétique chiffrée. C'est ainsi, par exemple, que la sévérité d'un étiage pourra dépendre plus de sa durée que du débit minimum, souvent, non pas toujours, significatif. Aussi le tableau n° 43 ([17]) des principaux étiages à Blois depuis cent neuf ans porte, outre le débit le plus faible, le minimum au-dessous duquel les eaux sont restées pendant dix jours (DC E), puis la moyenne mobile de trente jours consécutifs les plus maigres, enfin les nombres de jours où le débit a été inférieur à 50 m^3/s et à 80 m^3/s. Plusieurs exemples montrent que le minimum journalier et le « débit caractéristique d'étiage » sont insuffisants à décrire les pénuries. En 1933, les débits sont tombés à moins de 27 m^3/s pendant dix jours, et à moins de 29 m^3/s, soit 0,76 $l/s/km^2$, pendant trente jours consécutifs, ce qui classe l'étiage au second rang de toute la période séculaire avec celui de 1952. Mais, s'il est tenu compte du nombre de jours inférieurs à 80 m^3/s (2,1 $l/s/km^2$), l'épisode de 1933 descend à la dix-neuvième place et celui de 1952 à la onzième. Ces deux années n'ont pas laissé dans les annales le souvenir d'une aussi grave pénurie que celle de l'année 1870 : les DC E (27 m^3/s) sont tombés au-dessous de celui de 1870 (32 m^3/s) mais, cette année-là, le débit est resté inférieur à 80 m^3/s durant cent cinquante-sept jours, soit plus de cinq mois et presque aussi longtemps que durant l'étiage inégalé de cent soixante jours en 1949. Pareillement, le seul classement suivant l'ordre croissant des minima journaliers conduirait à sous-estimer les étiages de 1921 (qj minimum 38 m^3/s) et de 1962 (qj minimum 40 m^3/s) qui, après l'interruption d'une crue à la fin d'août dans le premier cas et à la fin de septembre dans le second, se sont prolongés en fait pendant tout le mois d'octobre avec des débits bien inférieurs à 50 m^3/s (figure 28). Des étiages très creux pendant dix ou trente jours tels ceux de 1905, 1929, 1953 et 1876 ont été, en fait, à cause de leur relative brièveté, moins nocifs que ceux de septembre 1961 ou d'août 1923.

La corrélation, bien qu'elle ne soit pas parfaite, entre les plus bas débits de Blois et de Gien ([18]), suffit à montrer que les années postérieures à la dernière guerre, pour lesquelles les débits sont le mieux connus à Gien, donnent pour cette station un échantillon de dix étiages dont le débit minimum spécifique a été inférieur à 1 $l/s/km^2$. Il est difficile d'en savoir exactement la valeur représentative à cause des incertitudes déjà plusieurs fois relevées. Quelques recoupements de rapports anciens émanant du Service de la Navigation de la 3ème Section de la Loire ([19])

([17]) L'établissement de ce tableau a été rendu possible par les relevés, en cette station, de la Circonscription Electrique Centre et Ouest (M. PELLECUER et F. BARRIERE, 1963).

([18]) Un exemple en est donné par la figure 28.

([19]) cf. notamment les dossiers 30670, 30884, 30887, 30893 des Archives du Loiret.

et d'évaluations de la Circonscription Centre et Ouest laissent penser cependant que les dix étiages énumérés au tableau n° 44 n'ont pas eu d'équivalents aussi fréquents au XIXème siècle et au début du XXème siècle.

TABLEAU N° 44

PRINCIPAUX ETIAGES A GIEN DEPUIS 1939

Année	*qj minimum*	
	en m³/s	*en l/s/km²*
1949	11	0,31
1947	20,5	0,57
1952	21	0,59
1945	21,9	0,61
1950	22	0,61
1961	25	0,70
1962 (1)	28	0,78
1964	29	0,81
1953	34	0,95
1943	35,2	0,98

(1) En réalité, l'étiage de 1962 a été plus grave que celui de 1961. Le débit y est resté inférieur à 1 l/s/km² pendant 56 jours au lieu de 31 jours en 1961.

Entre 1832 et 1939, en cent sept ans, d'après le relevé des minima atteints chaque année à l'échelle de Gien, treize étiages seulement auraient été plus graves que celui de 1943 ou du même ordre. En 1865 et en 1870, il aurait coulé au plus bas entre 20 et 25 m³/s à la seconde. Puis les années de très basses eaux se rangeraient dans l'ordre de gravité suivant : 1906 - 1904 - 1923 - 1911 - 1898 et 1907 - 1924 - 1921 - 1905 - 1918 et 1933.

L'examen ponctuel des étiages montre qu'il n'y a pas un parfait synchronisme entre toutes les stations du bassin. Bien que les plus graves pénuries soient généralisées, leur gravité n'est pas la même partout. Les discordances relevées entre Gien et Blois ne sont pas les seules, comme le montre le tableau n° 45 dans lequel sont présentés, pour quelques stations, les dix étiages les plus sévères depuis 1919 (sauf à Villerest, origine en 1920).

L'étiage général de 1949 n'a pas eu partout la même rigueur. C'est ainsi que, dans le Charolais où les jaugeages sont très récents, une enquête auprès des riverains sur les étiages dont ils ont gardé le souvenir a révélé que, depuis le début du siècle, 1921 et 1947 ont été les deux

seules années où l'étiage fut tel qu'il fallut interdire l'accès du canal du Centre, son alimentation ne pouvant plus être assurée. De même, en aucune autre année de mémoire d'homme, la Sorme, affluent amont de la Bourbince, (63 km² de bassin versant) ne fut tarie comme en 1921 et en 1947.

Dans le Velay (bassin témoin de la Borne), les dix plus graves pénuries depuis cinquante ans se sont manifestées après 1945 alors que, dans le proche bassin de l'Allier en amont de Vieille-Brioude, c'est au contraire la première moitié du siècle qui a connu les étés les plus pauvres, sept sur dix.

2. *Présentation cartographique*

Grâce à la représentation cartographique, il est possible de voir le phénomène en son ensemble et dans sa relation avec chaque partie du bassin. Les cartes qui ont été dressées ici pour cinq des plus graves étiages à Gien, 1949 - 1947 - 1961 - 1962 - 1964, présentent l'abondance spécifique en chaque station de jaugeage sous la forme de cercles proportionnels figurant le débit moyen des dix jours consécutifs les plus bas (figures 29, 30, 31 et 32). De la sorte, l'œil peut saisir d'un seul regard toutes les données rendues directement comparables d'une rivière à l'autre.

Outre l'inégale densité des points d'observation, ce qui apparaît d'abord sur toutes les cartes est le contraste entre l'abondance spécifique des courtes rivières de la bordure montagneuse et la pauvreté des collecteurs de plaine. La Dunières, la Gazeille, la Loire à La Palisse et le Vernazon, l'Allanche, la Couze de Pavin, le haut Lignon du Forez (Rory) ont toujours les débits les plus forts quel que soit l'étiage. Le fait est bien en harmonie avec les caractères de l'abondance moyenne pluviale : ces bassins sont à la fois les plus arrosés et les moins chauds en raison de leur exposition et de leur altitude moyenne. L'évaporation y est, en conséquence, moins active. Dans la moitié nord du bassin, le « golfe bourbonnais » et ses prolongements de Limage et du Forez, les étiages sont toujours plus pauvres, le pôle de faiblesse étant Digoin. Au delà de Nevers, le débit spécifique se relève légèrement jusqu'à Gien.

Parmi les rivières favorisées, l'Allanche et les Couzes sont les plus régulièrement abondantes. L'Allier à Lavalette et la haute Loire dont les débits leur sont quelquefois supérieurs (1961 et 1962) peuvent leur être très inférieurs. Ce second trait constant de régularité et d'abondance sur des rivières dont les bassins sont en majorité basaltiques ne s'explique toutefois pas entièrement par ce caractère lithologique. Le rapprochement des étiages les plus bas à Saint-Floret et des hauteurs de précipitations à Besse-en-Chandesse (poste assez représentatif de la pluviosité sur le bassin de la Couze Pavin) dévoile une corrélation meilleure avec les pluies d'été qu'avec les pluies de l'hiver précédent (tableau n° 46).

L'étiage de 1962 est, par exemple, l'un des plus sévères sur la rivière : les précipitations qui l'ont précédé (de janvier à la fin du mois de mai) ont été cependant particulièrement copieuses : 822 mm. En 1933, 200 mm de pluie seulement sont tombés du 1er janvier au 1er juin, quatre fois moins qu'à la même époque de 1962 ; or l'étiage n'en a pas moins, cette année-là, dépassé de 90 % celui de 1962 mais la hauteur des pluies d'été a aussi excédé de 65 % celle de 1962 (483 mm au lieu de 292 mm en 1962).

TABLEAU N° 46

GRAVES ETIAGES A SAINT-FLORET DEPUIS 1919

$\bar{q}$ 10 = débit moyen journalier des dix jours consécutifs les plus bas

Etiages à Saint-Floret		*P à Besse-en-Chandesse (en mm)*	
année	*$\bar{q}$ 10 (l/s/km²)*	*1/1 au 31/5*	*1/6 au 30/10*
1945	1	336	334
1962	1,60	822	292
1949	1,65	236	262
1947	2,15	346	370
1928	2,33	430	366
1950	2,51	326	315
1946	2,60	314	314
1961	2,90	449	449
1933	3,07	200	483
1926	3,10	633	346

Devant la répétition, en certains groupes d'années, d'étiages sévères, 1904, 1905, 1906, au cours de la décennie 1940-1949, ou encore 1959, 1961, 1962, 1964, la question de la liaison entre étiages successifs se pose (M. PARDE et J. SANSON, 1951 - M. PARDE, 1953). Les sécheresses répétées n'affaiblissent-elles pas la réserve hydrologique au point de la rendre totalement inefficace quand survient un été peu arrosé ? Il ne le semble pas : au terme d'une étude purement statistique sur les longues séries de quelques stations du bassin de l'Allier, aucune corrélation entre étiages d'années successives n'a été trouvée sur ce bassin (BABIN, JOLY et PINOIT, 1966). La Loire, avec ses affluents dont les débits d'étiage sont très irréguliers, sera a fortiori dans le même cas.

La description d'autres étiages ferait seulement ressortir la composition de ces différents caractères dans les proportions les plus diverses. C'est

l'étude du mécanisme des étiages qui contribuera à la pleine connaissance du phénomène, notamment du rôle qu'y joue le climat.

II. GENESE ET PROCESSUS DES ETIAGES

Sur l'arrière-plan des deux traits constants décrits ci-dessus, les étiages dont les cartes fournissent seulement cinq exemples offrent une grande diversité régionale d'une année à l'autre pour aboutir néanmoins à des débits du même ordre de grandeur à Gien. Les causes locales du débit cèdent donc à d'autres causes ayant leur siège hors du bassin. Ce sont les influences climatiques générales qui s'imposent aux conditions géographiques locales lors des grands étiages : raréfaction des pluies, durée exceptionnelle d'insolation, grandes chaleurs dont l'origine est toujours l'établissement durable de régimes anticycloniques sur l'ensemble de la France, ce qui n'exclut pas des pluies épisodiques parfois abondantes. Les hautes pressions maintiennent alors le Massif Central à l'abri des perturbations atlantiques dont les trajectoires sont rejetées vers les latitudes septentrionales (J. SANSON, 1950). En 1894-95, sur trois cent soixante-cinq jours, cent quatre-vingt-deux jours ont joui d'un temps anticyclonique,

en 1910-1911, 135 jours,
en 1928-1929, 213 jours,
en 1920-1921, 265 jours,
en 1948-1949, 254 jours.

Suivant la position, l'origine et la structure en altitude des hautes pressions, la direction et la vitesse des flux d'air qu'elles dirigent, il peut, à la raréfaction des pluies, s'ajouter l'élévation exceptionnelle des températures comme en 1945 (J. SANSON, 1946 a et 1946 b), en juillet 1947 (41°1 à Clermont-Ferrand) (P. PEDELABORDE, 1957, page 283) ou en 1949.

La misère hydrologique de 1949 a pour origine la conjonction d'un déficit pluviométrique intense de juin à août, de grandes vagues de chaleur dès le mois d'avril (température maximale de 31°3 à Clermont-Ferrand) puis en juin, août et septembre, enfin d'une insolation extraordinairement longue (G. BARDON, 1950 et J. SANSON, 1950). En 1962, en revanche, malgré une prépondérance anticyclonique, la sécheresse estivale prolongée a eu moins d'effet parce que la saison sèche est restée plus fraîche à part le mois d'août.

Au niveau des généralités, les différentes causes des étiages sont connues. Parmi elles, l'absence ou l'insuffisance des précipitations en quantité ou en durée est prépondérante encore que des pluies estivales abondantes puissent, elles-mêmes, du fait de la température variable de l'air et du sol, n'être d'aucun profit pour les débits si elles sont sous-

traites à l'écoulement par l'évaporation ou absorbées par la couverture végétale. Cette dernière restriction dit assez que la prépondérance attribuée au manque de pluies peut relever plus d'une logique abstraite du phénomène que de l'ordre du réel où l'évapotranspiration le dispute souvent aux pénuries pluviales dans la production des étiages ([20]). En revanche, l'action de la sécheresse et de l'évapotranspiration pourra être plus ou moins compensée par cette partie des eaux de pluie retenue dans le sol en période humide, restituée peu à peu par l'intermédiaire de sources souvent pérennes et qui entretient dans les talwegs des filets d'eau. Ce phénomène de rétention et de restitution a un rôle capital dans le régime des cours d'eau.

Ces trois grandes causes qui concourent à faire les étiages ce qu'ils sont, restent elles-mêmes dans la dépendance plus ou moins étroite du relief, du sol, du climat qui sont ceux du bassin versant. C'est dire qu'au niveau non plus général de l'explication théorique mais du particulier et du concret, il devient extrêmement malaisé de délimiter l'exacte portée de chaque cause et de chiffrer son influence sur le fléchissement des débits, autrement dit de découvrir le phénomène en ses « rouages ». « Toutes choses, disait Pascal, étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiates et immédiates et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties » ([21]). Tel est à peu près le cas ici.

« Connaître particulièrement les parties », qu'est-ce à dire en l'espèce sinon analyser l'aptitude d'un bassin versant à soutenir les étiages ? Cette aptitude consiste d'abord à mettre en réserve des eaux de pluie avant la sécheresse, ensuite à les restituer : capacité de la réserve et vitesse de restitution sont donc les deux paramètres à déterminer.

Deux méthodes d'évaluation sont possibles. Ou bien l'analyste s'appliquera à un inventaire détaillé des caractères lithologiques, morpholo-

---

([20]) En l'absence de pluie et en période chaude, l'effet de l'évapotranspiration devient sensible et se manifeste sur les hydrogrammes journaliers par des oscillations plus ou moins profondes suivant la température, l'intensité du rayonnement solaire, l'humidité de l'air, la vitesse du vent et la pression atmosphérique. C'est ainsi qu'un examen minutieux du ru de la Saignerie sur le petit bassin expérimental d'Alrance (Aveyron) a permis de déceler, au cours de journées sans pluie où la température moyenne a dépassé 10°, une diminution très rapide du débit de 9 h. à 18 h., un minimum plus ou moins accusé vers 18 h. ou 19 h., puis une augmentation lente jusqu'au lendemain matin vers 9 h. (H. DOSSEUR, 1964, pp. 116-132). H. DOSSEUR cite notamment le cas du tarissement du 24 août au 14 septembre 1953 pendant lequel un changement de temps a modifié les conditions de l'évapotranspiration. Les 10 et 11 septembre, le passage de fronts froids accompagnés de formations nuageuses sans pluie a entraîné une diminution des fluctuations journalières et même une croissance du débit, le 10 septembre, en l'absence de toute précipitation.

([21]) Pensées, 84. La Pléiade, page 1110.

giques et biogéographiques du bassin pour aboutir à des coefficients combinant les effets des principaux facteurs de l'écoulement : pente des versants, des interfluves et des talwegs, texture et structure des roches et des formations superficielles, nature et densité de la végétation — ou bien l'examen peut porter sur le débit du cours d'eau à la sortie de son bassin quand, les pluies étant nulles ou inefficaces, il est nourri uniquement par l'eau des sources. La décroissance des débits en périodes non « influencées » par les pluies s'opère suivant un rythme propre à chaque rivière et imprime aux hydrogrammes une forme originale, expression synthétique du complexe physique qu'est le bassin versant.

La première méthode a permis à C. MAITRE et à J. TRAUTMANN (1968) de définir un indice d'aptitude à soutenir les étiages (A E), rapport de l'indice de capacité d'absorption potentielle (C A P) à l'indice de vitesse de restitution (V R) ([22]). Les valeurs en sont rassemblées dans le tableau n° 47 pour les sept petits bassins versants du haut Allier, du Langouyrou, de l'Alagnon et de son affluent l'Allanche, du Sioulet, de la Queune et du Miodex. A une échelle plus grande, celle de vingt-six bassins élémentaires de l'Allier, et en fonction de critères différents, l'étude de M. MASSON (1966) relève de la même méthode. Elle aboutit à un classement des bassins versants en fonction de leur aptitude au ruissellement (tableau n° 47). Plus le coefficient « C » est élevé, plus le ruissellement est important et, par conséquent, plus l'infiltration est faible ([23]).

La seconde méthode — celle des courbes de décroissance — a l'avantage sur la précédente d'inclure dans le complexe physique du bassin versant les rapports réciproques de tous les facteurs du débit, y compris les conditions climatiques complètement négligées dans les deux études signalées plus haut. Peut-être est-elle aussi plus fidèle au conseil de Pascal et permet-elle, à son échelle, ce va-et-vient du tout aux parties et des parties au tout, au terme duquel est promise la connaissance des choses. Mais, d'évidence, cette méthode est applicable là seulement

([22]) Les principales étapes de cette étude minutieuse sont les suivantes :

— études sur le terrain, relevés cartographiques et analyses de laboratoire ;

— évaluation des paramètres : épaisseur, porosité, perméabilité du sol ; aptitude de la pente à l'infiltration et au ruissellement ; taux d'interception par la végétation et entrave au ruissellement ;

— types de combinaisons dans chaque bassin : 5.972 pour celui de l'Allier en amont de Lavalette (394 km²) par exemple, 7.341 pour celui du Sioulet (463 km²);

— recherche des fréquences associées aux divers types de combinaisons ; calcul de l'indice pondéré dans chaque bassin et de l'indice moyen rapporté à la même unité de surface pour établir des comparaisons entre types de bassins indépendamment de leur superficie.

([23]) Inspirés des tables de l'administration américaine « Soil Conservation Service », les tableaux des complexes « sol-végétation » de M. MASSON sont à double entrée : d'un côté, quatre classes de végétation : terres labourables, prairies, landes-friches, vignes-bois ; de l'autre côté, quatre groupes de terrains : A, B, C, D, du plus au moins perméable.

TABLEAU N° 47

INDICES HYDROLOGIQUES GLOBAUX DE BASSINS VERSANTS

A — D'APRES C. MAITRE ET J. TRAUTMANN

B — D'APRES M. MASSON

A — Indices hydrologiques globaux de bassins versants
(d'après MAITRE *et* TRAUTMANN*)*

CAP *capacité d'absorption potentielle*
VR *vitesse de restitution*
AE *aptitude à soutenir les étiages*

	Haut Allier 392 km²	*Langouyrou 66,5 km²*	*Miodex 99 km²*	*Queune 112 km²*	*Sioulet 464 km²*	*Alagnon 308 km²*	*Allanche 153 km²*
CAP	4,44	4,61	5,15	5,12	8,89	22,48	29,79
VR	2	1,54	1,48	0,42	1,08	1,75	0,39
AE	11,53	8,61	17,18	55,86	47,24	102,34	134,32

B — Classement relatif des bassins versants du point de vue de leur aptitude à produire du ruissellement superficiel sous une pluie identique (*du plus apte au moins apte*) (*d'après* M. MASSON)

	Indice
Doulon à Vals Le Chatel	83
Chapeauroux à Pont-de-Groslac	82
Langouyrou à Langogne	81
Grandrieu à Grandrieu	81
Faye à Giroux	80
Clamouze à Chastanier	80
Allier entre Alleyras et Vieille-Brioude	80
Ance du Sud à Saint-Préjet	80
Virlange à Pouzas	79
Chapeauroux entre Groslac et Auroux	79
Chapeauroux entre Auroux et Chapeauroux	79
Sénouire entre Sainte-Marguerite et Paulhaguet	79
Sénouire à Sainte-Marguerite	78
Seuge à Saugues	78
Dore à Giroux	77
Dore entre Giroux et Sauviat	77
Miodex à Sauviat	77
Couzon à Salet	76
Allier entre Vieille-Brioude et Vic-Le-Comte	76
Dolore à Moulin-Neuf	75
Couze de Chambon entre les Granges et Champeix	75
Couze de Chambon à Les Granges	73
Allier entre Lavalette et Alleyras	72
Alagnon à Joursac (moins l'Allanche)	71
Couze de Pavin à Saint-Floret	69
Allanche à Pont-du-Vernet	63

où les débits ont été mesurés (24). La confrontation, pour quelques bassins, des résultats obtenus de part et d'autre doit permettre de mieux mesurer les services respectifs des deux méthodes à vrai dire complémentaires.

A. La courbe de décrue ou de tarissement

1. *Le principe : la loi de tarissement*

Dans une vue théorique et simpliste du phénomène, le tarissement c'est-à-dire l'écoulement, en l'absence de pluie, des eaux gravifiques accumulées dans le sol a été assimilé à la vidange d'un réservoir à travers une paroi ou un bouchon poreux (25). Dans ces conditions, il est généralement admis que la décroissance sur une même rivière se fait toujours suivant un même rythme, correspondant aux caractères hydrogéologiques du bassin. L'hydrogramme de tarissement présente l'aspect d'une courbe exponentielle décroissante, asymptote à l'axe des temps, et dont l'expression analytique est une équation de la forme :

$$Q_t = Q_{t_o} e^{-\alpha (t - t_o)}$$

dans laquelle :

Q_t est le débit du jour t,

Q_{t_o} est le débit initial du jour t_o,

e est la base des logarithmes népériens,

α est le coefficient de tarissement, d'autant plus fort que la décroissance est rapide.

En cas de tarissement « pur », abstraction faite de l'évapotranspiration, le coefficient de tarissement suffirait à résumer l'influence du bassin versant. En outre, il permettrait en intégrant la courbe de décrue, de déterminer le volume des réserves souterraines susceptibles d'alimenter la rivière à partir d'un débit initial donné.

Volume de la réserve :

$$\int_{t_o}^{\infty} Q_{t_o} e^{-\alpha (t - t_o)} dt = \frac{Q\, t_o}{\alpha}$$

En fait, le phénomène naturel n'est pas aussi simple. La principale difficulté pour vérifier ici la convenance de cette loi est que les périodes non influencées par la pluie sont brèves et rares dans une région en partie montagneuse où le régime pluviométrique est précisément à dominante estivale. D'autres complications résultent du jeu de l'évapotranspiration réelle, variant, d'une part, avec la température et, d'autre part, avec le

(24) Un bon exemple en est donné par les observations poursuivies pendant une quinzaine d'années et complétées à plusieurs reprises dans le petit bassin de la Cane, affluent de la Vienne, près de Limoges, par M. GARRIGOU-LAGRANGE (1908).

(25) BOUSSINESQ et MAILLET, CASTANY (1963), COUTAGNE (1948), KOCH (1960), PARDE (1949 et 1964), ROCHE (1963), SCHOELLER (1962).

degré d'imbibition du sol ou, en d'autres termes, avec le débit initial de la rivière. L'extrême variabilité des débits de saison chaude dans le bassin de la Loire supérieure fait donc mal augurer qu'il existe une courbe unique de décroissance pour chaque rivière. Il reste que l'analyse théorique n'est tout de même pas sans quelque fondement. Sa vérification s'impose donc.

2. *Les décroissances réelles*

La recherche du coefficient α qui serait si utile à l'explication du comportement hydrologique a porté sur six bassins différents : ceux du Chapeauroux, de l'Allier à Lavalette, de la Sénouire à Paulhaguet, tous trois cristallins, de la Sioule à Pont-du-Bouchet, pour un tiers volcanique, de la Couze Pavin à Saint-Floret et de l'Allanche à Pont-du-Vernet, en majorité basaltiques (cf. fiches de bassin, tome II). Du point de vue de l'aptitude au ruissellement définie par M. MASSON, les bassins se classent ainsi, dans l'ordre décroissant :

le Chapeauroux	80,5,
la Sénouire	78,
la Couze de Pavin	69,
l'Allanche	63.

Et, là où ils ont été calculés, les indices d'aptitude à soutenir les étiages, A E (MAITRE et TRAUTMANN), prennent les valeurs suivantes :

bassin de l'Allier à Lavalette	11,53,
bassin du Sioulet, affluent de la Sioule	47,24,
bassin de l'Allanche	134,32.

Deux procédés ont permis de rechercher s'il existait sur ces bassins des décroissances à taux uniformes. Le *premier* consiste à porter sur un papier à ordonnées logarithmiques les débits journaliers lors de périodes sèches préalablement repérées. Si le taux de variation est constant, l'hydrogramme est représenté par une droite dont la pente permet de calculer aisément le coefficient α.

Pendant les tout premiers jours qui suivent les crues, la décroissance est toujours brutale sur les hydrogrammes de Lavalette et de Chapeauroux mais, au bout de trois à cinq jours, elle devient régulière et s'apparente à une droite sur un tronçon assez court de dix à douze jours au maximum. Ces tronçons ont été portés bout à bout sur les figures 33 et 35 et, sur la figure 34, ils ont pour origine, sur l'axe des ordonnées, le débit Qt_0. Celui-ci est très variable d'une décrue à l'autre au cours d'un temps d'observation relativement court : sept années, de 1958 à 1963. Tous les segments de droites sont loin d'avoir la même pente. Ainsi, pour les décrues d'été, les deux pentes extrêmes que l'on peut dégager de l'analyse des faisceaux donnent les valeurs de α suivantes :

0,0303 et 0,174 sur l'Allier,
0,069 et 0,162 sur le Chapeauroux.

L'écart observé sur l'Allier paraît résulter de la dispersion des débits initiaux : les décroissances les plus rapides, en juin 1963 et en octobre 1961, succèdent à de fortes crues où les débits maxima journaliers (respectivement 36,8 m^3/s et 30 m^3/s) ont été certainement supérieurs à la valeur décennale ([26]). Au contraire, la décrue la plus lente, en octobre 1963, fait suite à un palier de 3,96 m^3/s en valeur moyenne de débit journalier. Mais, pour un même débit initial, il est sûr qu'en plein été, la décroissance aurait pu être beaucoup plus rapide. D'évidence, l'adoption, dans un tel bassin, d'une pente moyenne de tarissement ($\alpha = 0{,}102$) peut grandement fausser les pronostics et, de toutes manières, pour calculer les chances d'occurence des étiages les plus graves, c'est la pente la plus forte, pour un débit initial donné, et non la pente moyenne, qui devrait être retenue. Pour le bassin du Chapeauroux, la moyenne est rendue plus significative par un meilleur groupement des tronçons de droite. Mais, plus encore que pour l'Allier, ceux-ci sont peu nombreux et, en tous les cas, trop courts pour qu'on puisse affirmer une permanence du coefficient α (moyenne = 0,115) lors de périodes sèches théoriques de vingt-cinq ou trente jours. Dans ce bassin pourtant soumis aux influences méditerranéennes, les périodes estivales non influencées sont exceptionnelles. En outre, les conditions thermiques et hygrométriques sont si variées au cours d'une même saison en raison de la forte altitude moyenne (1.200 mètres) que la baisse journalière est rarement uniforme.

Devant ces indéterminations et la difficulté pratique de repérer avec une certitude suffisante les périodes non influencées sur des bassins montagneux de 100 à 1.200 km^2, force a bien été de recourir à une *seconde* méthode et d'élargir l'analyse à toutes les décroissances habituelles des débits bruts à condition que les pluies « parasites », quand elles se sont manifestées, n'aient suffi ni à relever le débit moyen journalier ni à le maintenir plus de cinq jours au même niveau. Les taux moyens de décrue, pour des groupes de cinq jours consécutifs, ont été calculés en distinguant

1°) les décrues de saison froide (novembre à mai) et celles de saison chaude (mai à octobre), les plus intéressantes pour les étiages,

2°) à l'intérieur de chaque groupe, les décrues dont le débit initial est supérieur ou inférieur au DC 3 c'est-à-dire au débit de fréquence 75 %,

3°) pour les décrues de saison chaude, celles dont le débit initial est inférieur au débit moyen du mois d'août ([27]).

([26]) Pour la période d'observation récente qui porte sur quatorze années seulement, le DC 1 est de 21,2 m^3/s, et le DC 6 de 5,5 m^3/s.

([27]) Cette valeur a été choisie arbitrairement. Elle correspond à peu près (par défaut ou par excès) au DC 9. Elle peut être une référence commode pour les stations où les débits journaliers n'ont pas fait l'objet d'un classement.

B. Place du bassin versant dans le régime des étiages

Pour les six bassins, les résultats résumés dans le tableau n° 48 et sur la figure 36 conduisent aux remarques et conclusions suivantes ([28]).

1. Eté comme hiver, sur tous les bassins, la moyenne des *décroissances journalières des cinq premiers jours* est nettement plus forte que les jours suivants. Cette première phase de décrue ne caractérise pas encore le tarissement ; elle est sous la dépendance directe de l'averse antérieure et le fléchissement est toujours plus rapide, en toutes saisons, pour les débits initiaux supérieurs au DC 3. C'est en saison chaude et pour les débits les plus faibles que les disparités entre les rivières sont les plus marquées. La Couze de Pavin, la plus lente à décroître, baisse presque deux fois moins vite (6,4 % par jour) que la Sioule à Pont-du-Bouchet (11,5 %) qui enregistre le taux le plus fort. C'est aussi sur la Couze que le changement de pente dans l'hydrogramme est le moins marqué. Il l'est beaucoup plus fortement sur l'Allanche ou sur l'Allier à Lavalette. Même si les caractères moyens des averses en volume et en intensité étaient très opposés en chaque bassin, ils ne suffiraient pas à expliquer, par exemple, que deux rivières draînant des terrains en majorité basaltiques, la Couze de Pavin et l'Allanche, amorcent leurs décrues lentement dans le premier cas, et rapidement dans le second. Les conditions topographiques et lithologiques favorisent la prompte réaction de l'Allanche aux fortes averses malgré la grande capacité d'absorption totale de son bassin : dans un premier temps, la concentration des eaux est rapide dans les vallons d'amont tapissés d'un matériel à matrice fine travaillé par la solifluxion, et sur les vastes plateaux basaltiques où l'altérite souvent argileuse absorbe lentement l'eau de pluie. Au contraire, sur le flanc oriental du Mont Dore (bassin de la Couze de Pavin), l'infiltration est rapide dans les coulées de laves et les éboulis, épais et perméables en grand, reposant sur des brèches andésitiques imperméables, tandis que la complexité de la circulation dans les coulées superposées y ralentit et régularise la restitution. (R. MICHEL, 1958).

D'autres analyses comparées relatives aux diverses rivières confirmeraient cette *influence première du bassin versant dès le début de la décroissance.*

2. *Après le premier égouttement* des bassins, les taux moyens de

([28]) L'analyse a porté sur :
136 décrues à Saint-Floret dont 78 de saison chaude,
110 décrues à Lavalette dont 58 de saison chaude,
80 décrues à Pont-du-Bouchet dont 66 de saison chaude,
73 décrues à Paulhaguet toutes de saison chaude,
62 décrues à Pont-du-Vernet toutes de saison chaude,
44 décrues à Chapeauroux dont 24 de saison chaude.

décroissance de cinq jours en cinq jours diminuent et les inégalités de variations journalières s'intègrent dans des moyennes qui donnent une bonne image de la réalité globale. Reportés sur papier semi-logarithmique, les tronçons successifs s'alignent à peu près pour chaque rivière selon une pente propre à chacune d'elles (figure 36). En fait, à la fin des décroissances, les taux s'amoindrissent. Mais, comme il s'agit ici de courbes représentant les données du réel, qui incluent par conséquent l'intervention, si peu efficace qu'elle soit, de pluies toujours présentes, il peut être admis que *les rivières baisseraient, en régime propre et non « influencé », suivant un rythme uniforme.* C'est dire que le coefficient α de saison chaude dont les valeurs, pour les six rivières, sont inscrites ci-dessous traduit assez fidèlement l'influence globale du bassin versant avec ses particularités climatiques.

TABLEAU N° 49

COEFFICIENT DE TARISSEMENT α

Rivière	*Station*	*Toutes saisons*	*Saison froide (nov. à mai)*	*Saison chaude (mai à nov.)*
Allanche	PONT-DU-VERNET			0,048
Sénouire	PAULHAGUET			0,069
Couze Pavin	SAINT-FLORET	0,050	0,047	0,050
Sioule	PONT-DU-BOUCHET	0,060	0,057	0,060
Allier	LAVALETTE	0,063	0,064	0,058
Chapeauroux	CHAPEAUROUX	0,068	0,057	0,073

L'Allanche et la Sénouire draînant des bassins de même taille et de natures géologiques différentes se classent aux deux extrêmités de l'échelle. Entre l'Allier (394 km²) à Lavalette et le Chapeauroux à Chapeauroux (389 km²), la différence des rythmes de tarissement sans doute s'explique davantage par la topographie que par la géologie (cf. fiches de bassin de l'Allier à Lavalette et du Chapeauroux, tome II). En effet, le Chapeauroux et ses affluents, la Clamouze et le Grandrieu, traversent, dans la plus grande partie de leur cours, de hauts plateaux au pied de l'escarpement rectiligne de la Margeride et du Palais du Roi dans des vallons ou couloirs humides aux formes très mûres. Sur vingt kilomètres entre les confluences de la Boutaresse et de la Clamouze, par exemple, le profil du Chapeauroux est un long palier de pentes moyennes de 4 ‰. Ces larges espaces découverts, à peine vallonnés, tapissés d'arènes peu épaisses, offrent des surfaces d'infiltration considérables mais sont aussi très favorables à l'évaporation quand les arènes sont saturées d'eau. Au contraire, l'Allier et ses premiers affluents

coulent au fond de sillons profonds, étroits, ombreux, aux fortes pentes longitudinales, vers lesquels se précipitent les eaux : l'évaporation y est moindre.

3. Le tableau n° 50 met en lumière un troisième phénomène : *la variation du coefficient α suivant les débits initiaux*. En hiver, les décroissances sont, en moyenne, sauf sur l'Allier à Lavalette, toujours plus lentes. L'évaporation faible ou nulle, l'hibernation végétative des plantes, l'apport régulateur en certains cas de fusions nivales expliquent d'évidence le fait. Mais la saison froide est aussi la période des hautes eaux au cours de laquelle les débits initiaux des décrues sont, en général, plus élevés, et le cas de l'Allier à Lavalette met particulièrement en relief le rôle du débit initial sur le taux moyen de la décrue. Sur cette rivière, le coefficient de tarissement, contrairement aux cinq autres bassins, est plus fort en saison froide qu'en saison chaude. L'origine en est probablement le caractère méditerranéen de la pluviosité, qui disparaît très vite au nord de Langogne ([29]). Quand les averses brutales cessent de s'abattre sur ce bassin montagneux incisé de profondes entailles, l'amplitude des décroissances est très forte parce que le débit initial est très élevé. Sur les autres bassins, les précipitations étant moins intenses et plus homogènes, les différences de débits initiaux sont moindres et donc aussi les contrastes entre les décroissances qui les suivent ([30]). Les gros écarts entre les rythmes extrêmes de décroissance relevés sur l'Allier (α compris entre 0,03 et 0,17) trouvent ici leur explication. Sur le Chapeauroux, l'écart constaté est plus petit entre les taux extrêmes de décrue (0,07 et 0,16) parce que les violentes averses sont moins nombreuses et moins copieuses.

La variation du coefficient α suivant les débits initiaux apparaît encore clairement si, parmi les décroissances de saison chaude sont isolées celles qui partent des débits initiaux les plus faibles, inférieurs au débit moyen mensuel du mois d'août (tableau n° 50, ci-dessous).

a) Sur tous les bassins, les différences sont sensibles entre les tarissements qui succèdent aux débits les plus forts (supérieurs au DC 3) et ceux qui ont pour origine les débits plus faibles : *le taux de décroissance diminue quand baisse le débit initial*. Cette dépendance du coefficient α

([29]) L'étude d'une centaine d'averses survenues de 1958 à 1965 sur les trois bassins du haut Allier, du Chapeauroux très voisin et de la Seuge un peu plus septentrionale, rend clairement compte des différences climatiques des trois bassins. Sur le bassin de l'Allier, 27 % des averses ont précipité entre 85 et 180 mm chacune. Sur le bassin du Chapeauroux, 8 % seulement des averses ont atteint 85 mm sans dépasser 155 mm. Sur le bassin de la Seuge, aucun épisode supérieur à 85 mm ne s'est produit. (M. DACHARRY, 1966).

([30]) Sur le bassin de l'Allier à Lavalette, la neige a un rôle beaucoup plus faible que sur les bassins de la Couze de Pavin et de la Sioule.

cf. 2ème partie, chapitre II, pages 119 et 120.

TABLEAU N° 50

VALEURS DES COEFFICIENTS DE TARISSEMENT α DE SAISON CHAUDE SUIVANT LE DEBIT INITIAL

Rivière	*Tous débits initiaux*	*Débits initiaux supérieurs au DC 3*	*Débits initiaux inférieurs au débit moyen mensuel d'août*
Allanche	0,048	0,062	0,028
Couze de Pavin	0,050	0,058	0,040
Allier	0,058	0,072	0,035
Sioule	0,060	0,072	0,063
Sénouire	0,069	0,080	0,047
Chapeauroux	0,073	0,070	0,036

à l'égard des débits initiaux dans tous les cas suggère que l'action régulatrice de la réserve est faible.

b) C'est bien ce que confirme l'évaluation, par l'intégration de la courbe moyenne de décroissance, du *volume des réserves liquides souterraines* susceptibles d'alimenter le débit des rivières. Dans l'ensemble, pour des débits de l'ordre de fréquence 50 % (DC 6), 8 % (DC 11) et 2,7 % (DC E), la quantité stockée, exprimée en une lame d'eau répartie également sur le bassin est médiocre (au maximum 25,6 mm) et certai-

TABLEAU N° 51

VALEURS DE LA RESERVE (en mm) LORS DES ECOULEMENTS EGAUX AUX DC 6, DC 11 et DC E

Rivière	*Pour un débit égal au DC 6*	*Pour un débit égal au DC 11*	*Pour un débit égal au DC E*
Couze de Pavin	25,6	9,7	0,7
Allanche	20	12	9
Allier	21	6,8	5
Sioule	14,8	2,8	1,9
Sénouire	9,5	2	1,4
Chapeauroux	6	1,4	0,5

nement très inférieure aux capacités potentielles des bassins, qui ont été évaluées précédemment par d'autres méthodes ([31]) (tableau n° 51).

c) Dans le meilleur des cas, celui de l'Allanche (bassin basaltique), la réserve représente 5,6 % d'un débit de l'ordre du DC 6 et 10 % d'un écoulement égal au DC 11. Dans des conditions moyennes de température et de pluviosité, il faudrait 222 jours pour épuiser la réserve à partir du DC E, exactement 2,2 fois plus de temps que pour l'assèchement de la Sénouire (bassin cristallin), la plus mal soutenue par une infime réserve. La différence est faible.

d) Les réserves de la Couze Pavin s'épuisent notablement plus vite que celles de l'Allanche. C'est, dira l'observateur attentif aux données géologiques, que la proportion, forte dans les deux bassins, de terrains basaltiques est plus élevée d'un quart dans celui de l'Allanche dont le bassin doit, dès lors, mieux soutenir les étiages. Cela est vrai mais reste toutefois une explication insuffisante car comment se ferait-il alors que les deux rivières aient le même gros débit spécifique moyen d'étiage (3,2 l/s/km² et 3,1 l/s/km²) ? Ne faut-il pas chercher la cause de la différence relative à l'écoulement des réserves dans une constatation déjà faite sur le rôle de la réserve neigeuse ([32]) ? Les débits estivaux de la Couze sont plus dépendants des conditions climatiques que des conditions lithologiques.

e) La diminution plus rapide des réserves dans le bassin de la Sioule que dans celui de l'Allier à Lavalette est plus déconcertante. Peut-être s'explique-t-elle simplement par la trop courte période d'observation dans le cas de l'Allier ([33]). Cette étrangeté rend cependant attentif au fait que le classement des six rivières en fonction de leur aptitude à soutenir les étiages est en rapport étroit avec les valeurs de l'abondance pluviale moyenne sur le bassin. En effet, les bassins qui ont été définis comme les plus aptes à soutenir les étiages sont aussi parmi les plus arrosés :

	Réserves lors du DC 11	*Précipitations annuelles*
Allanche	12 mm	1115 mm
Couze de Pavin	9,7	1355
Allier	6,8	1185
Sioule	2,8	1045
Sénouire	2	767
Chapeauroux	1,4	845

([31]) cf. 2ème partie, chapitre II.
([32]) cf. pages 119 et 120.
([33]) Le classement des débits a été fait sur 14 ans seulement pour l'Allier.

L'Allier ne doit-il pas à une bonne alimentation pluviale de précéder la Sioule dont le bassin a une capacité d'absorption potentielle incontestablement plus grande, mais dont les eaux de surface cheminent plus lentement que celles de l'Allier, stagnent même à leur passage en de nombreux étangs (67 étangs sur 463 km² en amont de Pontaumur) et sont longuement exposées aux prélèvements de l'évaporation ?

f) D'après MAITRE et TRAUTMANN, l'indice d'aptitude à soutenir les étiages, A E, uniquement défini par les caractères physiques fixes du bassin versant est de

11,53 pour le bassin de l'Allier,
47,24 pour le bassin du Sioulet, affluent de la Sioule,
134,32 pour le bassin de l'Allanche.

Or les décroissances habituelles des trois rivières et les réserves moyennes sont loin d'accuser des contrastes du même ordre. L'indice hydrologique A E varie, par exemple, de 1 à 11,6 de l'Allier à l'Allanche alors que les réserves pour les débits initiaux égaux au DC 11 et au DC E ne varient même pas du simple au double. Dans le cas de l'Allier et du Sioulet, l'indice A E qui résume pourtant minutieusement les caractères géomorphologiques et biogéographiques du bassin versant ne suffit pas à décrire le rôle amortisseur du bassin et, par conséquent, son influence sur le régime des basses eaux. Finalement, là même où le complexe géomorphologique devrait avoir le maximum d'effet, les rivières étudiées reflètent, dans leurs débits, moins l'influence exercée par la réserve du sol que l'importance de la tranche d'eau annuelle précipitée sur les régions qu'elles traversent ([34]). Sans doute le rôle de la réserve souterraine n'est-il pas inexistant, il demeure, mais secondaire.

*
* *

En résumé, cette étude d'étiages apporte trois enseignements essentiels.

1. Quant au volume réel de la réserve et à l'évolution du tarissement, les six petits bassins choisis ont les traits communs d'une étroite parenté. Or ils sont, à tout autre point de vue, très divers. Ils vont des plus arrosés (Couze de Pavin et haut Allier) aux moins arrosés (Chapeauroux et Sénouire). Les précipitations y sont de régimes méditerranéen (Allier), océanique (Sioulet), continental (Sénouire). Ils donnent des exemples extrêmes de caractères morphologiques et hydrogéologiques opposés (Allanche et Sénouire). Certaines rivières de ces bassins ont les basses eaux les plus abondantes, telles la Couze de Pavin, l'Allanche, la Sioule,

([34]) A. MEYNIER (1946), à propos du régime comparé des rivières cantaliennes et limousines, avait justement remarqué que les maigres d'été, un peu moins accusés sur les premières, n'avaient pas leur cause dans une plus grande capacité de rétention des terrains volcaniques.

les autres ont les étiages les plus déprimés. C'est d'ailleurs la conjonction de leur unique trait commun et de leurs diversités qui justifie et garantit la généralisation du trait commun à l'entier bassin de la Loire jusqu'à Gien dont les basses eaux sont ainsi expliquées en tous leurs aspects : indigence extrême parmi les rivières du type pluvial océanique malgré le caractère montagneux du bassin versant ; retours annuels des étiages au rythme des saisons thermiques malgré l'irrégularité dans l'abondance ; aggravation d'amont en aval bien que, du Charolais au Nivernais, le fleuve reçoive des rivières dont l'alimentation pluviale de saison froide devrait assurer une bonne recharge des nappes.

2. Ce sceau ligérien dont sont marqués les six bassins est original. Un coup d'œil aux bassins voisins appartenant ou non à la Loire en persuade. Sur le bassin de la Bourbince et celui de l'Arroux, l'étude de quelques étiages pendant sept années a permis de retenir un coefficient de tarissement moyen d'été de 0,082 qui, appliqué au débit moyen de l'Arroux pour les années connues (32,2 m^3/s, soit 9,75 $l/s/km^2$), fait apparaître que la réserve moyenne est égale à une lame d'eau de 10 mm seulement sur ce grand bassin de 3.300 km^2 (D.A.T.A.R., 1967). En revanche, en dehors du domaine ligérien, sur le petit « périmètre » d'Alrance ([35]), la réserve moyenne pour un débit de l'ordre du DC 6 serait de 34 mm. D'après les caractères du tarissement de rivières limousines, la Cane (20 km^2) et la Vienne à Saint-Priest-Taurion (1.165 km^2), décrites par M. GARRIGOU-LAGRANGE (1908) et A. PERPILLOU (1940), la réserve sur le bassin de la Vienne en montagne limousine serait beaucoup plus forte, de 55 mm. Le bassin de la Dordogne en amont de l'usine de Marèges retiendrait à peu près, en saison d'été, pour un débit légèrement inférieur au module, un volume d'eau équivalent à une lame de 45 mm (J. MAGRIN, 1954).

3. La place éminente du climat parmi les causes des étiages, et son corollaire, la pauvreté des réserves, signifient concrètement que le bassin aura un rôle régulateur sur les débits seulement si les pluies ont d'abord empli les faibles réserves, si donc les pluies ont au moins atteint ce minimum-là.

La connaissance du bassin en tant qu'amortisseur des débits ne peut aller sans que soient étudiés les bilans comparatifs des précipitations et des débits dans les conditions les plus variées, dans celles notamment où les averses sont suffisantes pour provoquer des crues. Car c'est lors des crues que la réserve peut être saturée par un volume d'eau surabondant et c'est quand la réserve est pleine que sa capacité réelle peut être le mieux évaluée.

([35]) P annuelles : 1.220 mm, altitude moyenne : 890 mètres, bassin versant : 3,15 km^2, DC 6 : 40 $l/s/km^2$, α : 0,032.

CHAPITRE IV

AVERSES ET CRUES

Les débordements extraordinaires de la Loire au milieu du XIXème siècle (octobre 1846, juin 1856, octobre 1866) dont la puissance n'a pas été dépassée depuis lors entre le Bec d'Allier et le confluent de la Vienne (1) ont eu des précédents célèbres, en septembre 1586, juin 1709, novembre 1710, février 1711, mai 1733, novembre-décembre 1755, novembre 1790, décembre 1825. Leurs désastreuses conséquences sont brièvement relatées dans des chroniques particulières, requêtes de paroisses en réduction de taille et livres de comptes communaux, qui ont permis d'en établir la chronologie, malheureusement lacunaire et imprécise à mesure qu'on remonte le cours des âges (2). Mais, surtout, sur plus de cinq cents kilomètres que parcourt la Loire à travers les formations sédimentaires, le paysage tout entier de la vallée porte les marques durables des destructions et constructions du flot en crue : la topographie en dépend ; l'occupation humaine y est réglée par les risques de submersion ; les levées, « signes visibles d'un travail collectif plusieurs fois séculaire, ajoutent à la majesté des perspectives fluviales » (3). N'est-il pas significatif que, vingt-sept ans après avoir publié son ouvrage intitulé le « Val de Loire », Roger Dion, invité à le rééditer sous des proportions réduites, ait sacrifié maints développements antérieurs pour choisir, selon ses propres termes, « parmi les caractères distinctifs du pays décrit, ceux

(1) Sur la basse Loire, en revanche, les cotes relevées en juin 1856 ont été plusieurs fois dépassées. A Montjean, par exemple, la cote de 6 m 26 (juin 1856) a été dépassée en février 1904 (6 m 31), en décembre 1910 (6 m 78), en avril 1919 (6 m 36), en mars 1923 (6 m 56), en janvier 1936 (6 m 68), en janvier 1941 (6 m 32), en décembre 1952 (6 m 35). Les eaux ont presque atteint la cote de 1856 en décembre 1872 (6 m 20), en janvier 1924 (6 m 23), en décembre 1944 (6 m 13), en janvier 1945 (6 m 15) et en janvier 1955 (6 m 17). Il faut toutefois préciser que, lors des crues historiques telles celles de 1856 et 1910, les cotes auraient été sensiblement supérieures sans la rupture des digues, et, en 1910, celle de 7 m 10 aurait sans doute été atteinte ou bien près de l'être.

(2) cf. principalement, M. CHAMPION (1858 à 1863), M. JOLLOIS (1881), M. MAZOYER (1890), L. GALLOUEDEC (1910), BABINET et MAILLET (1919), H. ONDE (1923), R. DION (1934 et 1961), M. PARDE (1964 b), E. GENESLAY (1972).

(3) R. DION (1961, page 10).

qui procèdent du pouvoir qu'a la Loire de le noyer sous les eaux de ses grandes crues » ?

Ce n'est pas seulement à leurs effets catastrophiques et à leur fréquence mais aussi à leur puissance intrinsèque que ces grandes crues de la Loire doivent leur funeste notoriété. Lors des événements exceptionnels de 1846, 1856 et 1866, le débit, suivant les évaluations de Sainjon probablement un peu surestimées (4), aurait été respectivement de 8.500 à 9.800 m³/s, de 8.800 à 9.000 m³/s et de 9.300 m³/s après la confluence de la Loire et de l'Allier. C'est dire que le coefficient $A = \frac{Q}{\sqrt{S}}$ (où Q est le débit maximum et S la surface réceptrice), grâce auquel M. PARDE (1963) a pu, avec une certaine approximation (5) comparer et classer les plus grandes crues observées dans le monde, vaudrait de 47 à 52 environ au Bec d'Allier, plus que sur les autres rivières françaises ou européennes à leur paroxysme, exception faite du Pô à Piacenza et de la Durance à Mirabeau qui draînent des surfaces montagneuses soumises aux violences pluviales méditerranéennes (tableau n° 52).

Pour les crues comme pour les étiages, le secteur de la Loire moyenne fait montre d'excès plus graves qu'en aval de Tours. En cette dernière station, pour un bassin versant plus étendu que celui de Gien d'à peine 10 %, le coefficient A n'est plus, en effet, que de 30 à 33,8 contre 47 à 52 au Bec d'Allier. L'absence, entre ces deux points du Val, d'apport affluent notable contribue à étaler des crues imparfaitement conjurées par les levées, et à écréter l'onde progressant vers l'aval. La puissance manifestée au Bec d'Allier lors des gonflements les plus graves depuis le début du XIXème siècle n'a jamais été atteinte après la confluence de tous les grands tributaires de la Loire à Montjean en amont de Nantes où les débits ont été :

5.500 m³/s en juin 1856 (6),
6.355 m³/s en novembre-décembre 1910,
5.355 m³/s en mars 1923,
6.160 m³/s en janvier 1936,

alors qu'en 1846, 1856, 1866, Loire et Allier ensemble ont roulé 9.000 m³/s, soit à peu près quatre fois le débit maximal de la Seine à Paris en janvier 1910. Parce que, à Gien, sont intégrées les crues successives ou concordantes des deux branches maîtresses du haut réseau ligérien réunies à 93 km en amont, cette station est le lieu privilégié de leur observation. Ce qui n'exclut pas les mouvements du regard

(4) M. PARDE (1964 b, page 94).

(5) Sur le principe de cette appréciation numérique des crues en fonction des surfaces réceptrices, cf. A. GUILCHER (1965), M. CHARTIER (1959), J. TRICART et F. HIRSCH (1960).

(6) S'il n'avait pas été artificiellement abaissé par les ruptures de digues, le débit aurait probablement dépassé 6.000 m³/s.

vers l'amont pour l'intelligence de ce que M. PARDE (1964 b, p. 82) a appelé « un véritable monde, extrêmement varié, d'événements et de causes, de types et d'exceptions ».

Ce monde, nombre de géographes et d'ingénieurs l'ont déjà diversement exploré. En conséquence, les connaissances particulières déjà acquises et dont la synthèse a été présentée par M. PARDE (1964 b, pp. 82 à 134) dans ses « Etudes potamologiques sur la Loire et ses affluents » doivent seulement être rappelées dans la description d'ensemble des phénomènes et de leur genèse.

I. LA PART DES CRUES DANS LE REGIME DE LA LOIRE SUPERIEURE

A. Le régime torrentiel

A Gien, à l'issue des 35.890 km² de bassin versant, le débit de la Loire a encore certains caractères d'un torrent (7). Des intumescences de toutes tailles dessinent sur les hydrogrammes des pointes multiples, encore très sensibles sur les courbes de débits moyens journaliers qui donnent cependant une image légèrement estompée du phénomène (8). Les évolutions journalières, en 1965, à Nevers et à Pont-du-Guétin ont déjà illustré ce caractère des deux tributaires de la Loire berrichonne (figure 15).

A la confluence des deux rivières, ce caractère d'immodération est d'ailleurs plus accentué sur la Loire que sur son affluent (9). Les diagrammes de la figure 37 A et B démontrent que c'est à ses crues que la Loire doit une abondance moyenne brute supérieure à celle de

(7) G. STARON (1970) a bien décrit le rythme extrêmement irrégulier de la Loire vellave en pulsations brutales dans un lit presque toujours occupé par un filet d'eau.

(8) L'écart entre le débit maximum instantané (DMI) et le débit moyen journalier maximum (DMJ) est d'autant plus faible que le bassin est plus étendu. Pour les stations de Nevers, Pont-du-Guétin et Gien, la corrélation est étroite. Le rapport $\frac{DMI}{DMJ}$ est, en moyenne, de 1,037 au Guétin (échantillon de trente cas), de 1,042 à Nevers (trente-cinq cas) et de 1,025 à Gien (trente-trois cas), la valeur maximale en cette station étant de 1,09. Les échantillons utilisés comptent un nombre d'effectifs trop réduit pour qu'en soient tirées des conclusions définitives mais ces valeurs peuvent être comparées à celles retenues par le Centre Hydrométéorologique « Massif Central » d'E.D.F. à Brive pour la Loire à Grangent : $\frac{DMI}{DMJ} = 1{,}5$ (bassin versant : 3.850 km²), et à Villerest : 1,2 (bassin versant : 6.520 km²), sur des échantillons de vingt-cinq et vingt cas. Les rapports paraissent indifférents à la taille de la crue.

(9) cf., plus haut, pages 88, 89.

l'Allier. Pendant un grand nombre de jours, qui peut atteindre 300 comme en 1959, l'Allier apporte plus d'eau à la Loire que l'artère maîtresse, alors que la supériorité de la Loire s'établit pendant les crues. En effet, si, au cours de chaque épisode de crue, le fleuve et son affluent participaient également au flot du collecteur, le débit de la Loire devrait être de 56 % et celui de l'Allier de 44 % du total, cette proportion correspondant exactement au rapport des surfaces réceptrices comme à celui des abondances moyennes annuelles. L'évaluation des modules par M. PARDE (1964 b, p. 32) se trouve confirmée sur ce point par les observations faites avec assez d'exactitude par la Circonscription Electrique depuis 1949 à Nevers et 1955 à Pont-du-Guétin. Pour ces quatorze années, la part de la Loire supérieure et celle de l'Allier ont été portées au tableau n° 53.

TABLEAU N° 53

PARTS RESPECTIVES DE LA LOIRE ET DE L'ALLIER DANS LE DEBIT MOYEN ANNUEL AU BEC D'ALLIER, DE 1955 A 1969

année	*Loire (%)*	*Allier (%)*
1955	60	40
1956	56,5	43,5
1957	56	44
1958	52,8	47,2
1959	47,2	52,8
1960	51	49
1961	57,5	42,5
1962	54,2	45,8
1963	53,8	46,2
1964	50,2	49,8
1965	58,9	41,1
1966	58,7	41,3
1967	57,5	42,5
1968	57	43
moyenne 1955-1968	55	45(1)

(1) Ce calcul a pour base les débits mesurés. En reconstituant les débits de la Loire influencés par les prélèvements de Montpezat et de la ville de Saint-Etienne, les proportions sont de 55,5 % pour la Loire et 44,5 % pour l'Allier.

Or, par référence à cette participation moyenne théorique, le classement des épisodes de crues — ou plutôt des intumescences dénombrées au cours de ces quatorze années — met en relief une participation relative plus considérable de la Loire lors des épisodes les plus puissants, ceux

au cours desquels le débit a dépassé 1.000 m³/s à Gien. Que le recensement porte sur le débit moyen journalier maximum (figure 37 A) ou sur le volume net de crue (figure 37 B), la conclusion est identique ([10]).

Enfin, la Loire doit assurément à la brusquerie de ses gonflements multipliés son qualificatif de torrentielle. A Nevers, le 19 octobre 1846, lors de la plus forte crue extraordinaire connue en cette ville avec celle de 1866 (hauteurs respectives de 6 m 33 et de 6 m 36), les eaux montèrent en douze heures de la cote 2 m 50 à la cote 6 m 33. Le 29 mai 1856, à Gien, l'eau était à moins de deux mètres aux premières heures du jour ; le 1er juin, elle atteignait 7 m 19 puis redescendait à moins de 5 m le 5 juin et au-dessous de 3 m le lendemain. En septembre 1866, la montée fut aussi effrayante : de 0 m 60 le 23 septembre à 7 m 19 le 27. Les récits consignés dans les chroniques les plus anciennes omettent rarement de signaler la soudaineté des événements les plus graves ([11]). Mais des gonflements beaucoup plus faibles présentent ce même caractère. Le 30 octobre 1943, le débit était, à Gien, dix-sept fois plus fort (2.897 m³/s) que cinq jours auparavant. En septembre 1956, le débit passait brusquement de 175 m³/s à 990 m³/s à Gien, de 84 m³/s à 832 m³/s à Nevers, de 55 m³/s à 300 m³/s à Pont-du-Guétin. En mai 1964, décembre 1952 ou janvier 1962, parmi beaucoup d'autres crues, les eaux montent avec un emportement du même ordre.

A ne retenir que la vivacité, typique en effet, les moindres poussées du débit pourraient être considérées comme des « crues » même à l'époque

([10]) Le débit moyen journalier maximum n'est pas un indice parfait de la puissance des crues. S'il permet une première appréciation comparative, il n'est pourtant pas suffisant. Le rôle du débit initial sur la hauteur de la crue ne peut pas être négligé. En période de hautes eaux — c'est le cas, par exemple, de l'épisode du 6 novembre 1944 (1.256 m³/s à Gien, débit initial : 528 m³/s) — des chutes de pluie médiocres peuvent suffire à gonfler les eaux de la rivière. Le maximum peut être le même que celui de crues résultant d'averses violentes ou massives survenant en périodes de basses eaux. Ainsi, le 13 novembre 1958, le débit maximum a atteint 1.250 m³/s à Gien. Quelques jours avant la montée des eaux, le débit moyen journalier était de 185 m³/s. Le phénomène en soi est bien plus remarquable que le précédent. En d'autres termes, la considération du volume d'eau écoulé au cours de la crue est essentielle à la connaissance du phénomène. *Le volume net de crue* est celui qui s'ajoute au débit de base c'est-à-dire au débit qui se serait écoulé si la crue n'était pas survenue : il est de 232 millions m³ pour le premier épisode (1944) et de 710 millions de m³ pour le second (1958). Le volume brut est le volume total de l'intumescence : 550 millions de m³ en 1944 et 1.100 millions de m³ en 1958.

([11]) Le registre-journal d'Henri IV, par exemple, rapporte que la crue d'octobre 1608 « fist un dommage et degast indicible.... dura vingt-quatre heures et survinst tout à ung instant, sans qu'on y pensat aucunement », cité par R. DION (1961, page 54).

La crue de décembre 1755 surprend de même les riverains : « Toutes les rivières qui affluent dans la Loire étant très débordées l'ont fait grossir si prodigieusement qu'elle a rompu ses digues dans les paroisses de Fleury (à l'ouest de Decize), Uxeloup et autres paroisses riveraines, et emporté les marchandises qui étaient sur les ports, bois de mousle, charniés, traversins, bois de charpente et autres.... » (G. POURSIN, 1972).

où elles méritent à peine cet épithète ([12]). Depuis 1926, en quarante-cinq ans, les eaux n'ont pas atteint à Gien la cote de 5 m, quatorze fois dépassée de 1825 à 1926 (figure 38). Le classement des intumescences ayant dépassé 500 m³/s à Gien pour le débit moyen journalier, entre 1955 et 1970, fait apparaître une valeur médiane médiocre comprise entre

800 et 900 m³/s de débit moyen journalier maximum (figure 39),
600 et 700 millions de m³ de volume brut (figure 40 A),
200 et 300 millions de m³ de volume net (figure 40 B),

toutes données établies à partir du tableau général des crues (tableau n° 54).

Cette dernière valeur médiane du volume net équivaut à une lame d'eau écoulée de l'ordre de 6 à 9 mm, hauteur obtenue en divisant le volume de l'excédent d'eau dû à la crue (volume net) par la surface du bassin versant. Sans doute, cette valeur est-elle sousestimée d'environ 25 % en raison de la méthode utilisée pour calculer le volume de crue, l'écart portant essentiellement sur l'évaluation du débit de base ([13]). Le moyen le plus rationnel pour ces calculs eut été de dessiner pour chaque crue la courbe d'évolution des débits à partir de l'hydrogramme des hauteurs en respectant les correspondances hauteurs/débits données par la courbe de tarage. Le planimétrage de la surface comprise entre la courbe de crue et la courbe supposée de tarissement donnerait alors directement le volume net. Plutôt que d'appliquer à un très petit nombre de crues ce minutieux procédé qui n'est pas d'une absolue certitude puisque, de toutes manières, les débits sont extrapolés à Gien au-dessus de 2.200 m³/s, il est peut-être plus sûr d'examiner le plus grand nombre possible de crues à Gien, Nevers et Pont-du-Guétin pour en calculer approximativement le volume. Pour les cent-quatre-vingt-douze crues étudiées en chacune de ces trois stations, le calcul est fondé directement sur les débits moyens bruts journaliers et sur un débit de base qui est un débit journalier moyen pendant toute l'intumescence, proche du débit initial ([14]). L'évaluation à 25 % de l'erreur moyenne possible par défaut pour le volume net résulte de l'examen de cinquante-trois crues pour lesquelles ont été comparés

---

([12]) cf., ci-dessus, pages 63, 65.

([13]) C'est aussi une différence dans l'appréciation du débit de base qui entraîne des divergences entre les évaluations de E. GENESLAY (1972, pp. 68 à 75) et celles qui sont données ici — notamment pour les crues de novembre-décembre 1944, janvier et février 1955. E. GENESLAY admet comme débit de base le débit moyen annuel de l'année où est survenue la crue. De toutes manières, les résultats sont difficilement comparables, l'auteur groupant des épisodes de crue, qui ont été distingués ici.

([14]) Pour chaque jour, le débit net (Qj net) est égal au débit brut (Qj brut) moins le débit de base (Qj base), et le volume net de crue

$$V \text{ net} = Q \text{ net} \times 86.400.$$

cf. M. PARDE (1949, pages 230-234).

1) les débits de base établis d'après une valeur journalière moyenne,

2) les débits de base définis par une courbe de tarissement à pente variable suivant la saison, le débit initial et la proximité de l'intumescence précédente. L'erreur relative possible est évidemment d'autant plus faible que le volume de base est plus réduit par rapport au volume de la crue, si bien que la forte proportion de crues modestes dans cet échantillon de cinquante-trois crues laisse penser que l'erreur sur les grandes crues serait moindre, de l'ordre de 15 à 20 %, ou moins encore (15).

Quoiqu'il en soit, la rareté des grandes crues depuis cinquante ans n'autorise pas à accorder aux observations sur les volumes de débit durant cette période récente une valeur autre qu'indicative qui trouvera surtout son intérêt au chapitre de l'abondance. Il n'est surtout pas question de fonder sur elles une étude sérieuse des fréquences mensuelles ou saisonnières. Pour celle-ci, force est d'avoir recours aux hauteurs d'eau des maxima, dont la signification est certes fragile pour une étude détaillée des débits à cause des changements intervenus dans le lit au droit des échelles, mais dont le repérage a été continu depuis cent quarante-quatre ans.

B. La discordance entre le rythme des grandes crues et le régime moyen global

La distinction entre grandes crues et crues secondaires est dictée par les faits. La cote de 3 mètres au-dessus de l'étiage à Nevers, celles de 3 m - 3 m 50 du Bec d'Allier à Gien sont associées à l'état critique initial du fleuve, celui où, hors l'abri des levées, les eaux commencent à gagner les prairies du Val. Pourtant les crues de 3 à 4 m sont sans danger réel (16). L'émotion s'empare avec raison des riverains quand la montée des eaux dépasse 4 m 50. Puis, à 5 mètres, cote dite de « mobilisation » par le Service d'Annonce des Crues, la menace est imminente : la grande crue est amorcée. Le débit est alors de 3.000 m³/s à Gien.

Quatorze fois en un siècle et demi, à Gien, de grandes crues supérieures à 5 mètres se sont produites, soit 12 % du total des intumescences qui ont dépassé 3 mètres au cours de cette période. Le plus grand nombre des débordements relève donc de la catégorie des crues moyennes, de 3 à 5 mètres, dont le compte plus précis pendant les mêmes cent quarante-quatre ans est le suivant :

(15) Quinze crues seulement sur cinquante-trois ont dépassé 2.000 m³/s de débit moyen journalier maximum, dont les trois plus puissantes ont donné respectivement 3.026 m³/s en mai 1940 et janvier 1941, et 3.364 m³/s en décembre 1944.

(16) Là où il n'y a pas de levées, ces premiers débordements sont dangereux pour l'agriculture riveraine quand ils surviennent en été.

de 3 m	à 3 m 50 :	29 crues,
de 3 m 50	à 4 m :	29 crues,
de 4 m	à 4 m 50 :	28 crues,
de 4 m 50	à 5 m :	17 crues,
		103 crues.

Exprimées graphiquement par les figures 41 et 42, les fréquences mensuelles des deux classes principales de crues grandes et moyennes (ces dernières qualifiées parfois de secondaires ou ordinaires) appellent quelques commentaires.

1°) Les crues de plus de 5 mètres et les crues secondaires (de 3 à 5 m) ne se répartissent pas de la même manière dans l'année. Les crues secondaires peuvent surgir en n'importe quel mois, selon toutefois des probabilités variables,

janvier, février et novembre, à égalité (13,6 %),
puis mars, avril ou octobre, à égalité (10,7 %),
décembre (9,7 %),
juin (7,8 %),
mai (5,8 %),
septembre (2 %),
juillet et août (1 %).

Les mois de janvier et de février, les plus riches en événements ordinaires, n'ont pas connu de grandes crues entre 1825 et 1970 et, en novembre, les crues moyennes sont deux fois plus fréquentes que les grandes.

L'automne est incontestablement la saison des grandes crues avec un maximum d'occurence en octobre (35,7 %) et des crues presque toujours très fortes en septembre. Un second maximum se manifeste au mois de juin qui connaît mais à un moindre degré une recrudescence des crues moyennes. En mars, de même, les crues peuvent manifester une certaine violence bien que celles de moins de 5 mètres soient toujours plus nombreuses en valeur absolue et en valeur relative.

2°) La période couvrant les trois dernières décennies, 1939-1970 (figure 42 A), outre la particularité d'être passée sans aucune grande crue, offre une répartition mensuelle des crues ordinaires assez différente de celle qui se rapporte à la longue série d'observations une fois et demie séculaire (figure 42 B). Pour la période courte, janvier a nettement l'avantage sur le mois de février qu'il égale dans la longue série. Les mois de juin, juillet, août et septembre n'ont, depuis trente ans, enregistré aucune crue digne de ce nom et, à leur suite, octobre fait pâle figure à côté de la place qu'il tient de 1825 à 1939. Bref, la preuve est faite une nouvelle fois qu'une période trentenaire est bien insuffisante, au moins dans le cas de la Loire, pour que soient révélées toutes les formes de la vie du fleuve.

3°) Rapprochés des coefficients mensuels de débit dont les courbes représentent en une figure simple le régime global ([17]), les histogrammes de la figure 42 A et B font apparaître une étroite corrélation entre le régime moyen et les intumescences secondaires qui confèrent au régime son caractère torrentiel. Il est vrai que le mois du maximum annuel est presque toujours celui où s'est manifestée la plus grande crue de l'année et que, de ce fait, sa date varie beaucoup d'une année à l'autre (cf. tableau n° 21 A). Quant aux grandes crues, elles se singularisent par leur étrangeté relativement à l'évolution des débits moyens mensuels. Leur manifestation intempestive au cours des mois de basses eaux évoque bien les violences méditerranéennes et les brusques orages « continentaux » desquels elles procèdent. Trait essentiel du régime, elles font pourtant discordance dans la grande famille des crues, ce qui pose le problème des origines. Des crues de même saison mais de puissances très différentes peuvent-elles être filles d'événements météorologiques du même type ? En ce cas, quelles sont les circonstances particulières qui concourent à rendre les unes monstrueuses et les autres insignifiantes ?

4°) Les différences entre les fréquences mensuelles des crues fortes et moyennes grandissent jusque vers Gien puis s'atténuent progressivement à l'aval et disparaissent pratiquement quand le fleuve termine sa course. En effet, l'histogramme des grandes crues à Montjean (figure 41 A), pour la même période qu'à Gien (figure 42 B), a un dessin totalement différent qui évolue, en gros, parallèlement à la courbe du régime mensuel moyen ([18]). La répartition saisonnière des grandes crues n'a, ici, plus rien d'insolite.

C'est assurément de l'amont que la Loire moyenne hérite ses excès en début et en fin de saison chaude (mai-juin et septembre-octobre). Quelques sondages en diverses parties du bassin, aux stations de Bas-en-Basset sur la haute Loire (3.300 km²), de Vieille-Brioude sur l'Allier (2.260 km²), de Pont-du-Bouchet sur la Sioule (1.170 km²) et de Giroux sur la Dore (822 km²) montrent tout d'abord que les grandes crues sont les plus fréquentes sur la haute Loire (figures 43 et 44). Sur ces quatre bassins, le critère du partage entre crues grandes et secondaires reste lié au débit selon les rapports, en partie arbitraires, suivants : sont classées comme grandes les crues dont le débit moyen journalier maximum vaut dix fois et plus le module ; sont classées comme secondaires les crues dont le débit moyen journalier maximum vaut de cinq à dix fois le

([17]) Sur les figures 41 B et 42 A et B, la courbe de Gien (1919-1960) n'est pas la seule. Elle est doublée en pointillés par celle de Blois, qui décrit plus exactement le régime « normal » puisqu'elle a pour base des données remontant à 1863.

([18]) La figure présente les crues supérieures à 5 mètres et aussi celles de plus de 6 mètres. Les deux histogrammes diffèrent par quelques détails qu'on peut considérer comme négligeables et dont l'explication ne relève pas de la présente étude.

module ([19]). Les proportions respectives des deux catégories de crues auxdites stations ainsi qu'à Gien, sont données dans le tableau suivant.

Station	*Pourcentage des crues fortes dans le total des crues*	*Pourcentage des crues faibles dans le total des crues*	*Nombre total des crues*
Bas-en-Basset	28 %	72 %	98
Vieille-Brioude	24	76	99
Pont-du-Bouchet	15	85	75
Gien	*12*	*88*	*103*
Giroux	0	100	59

C'est à titre purement indicatif que les valeurs de Gien figurent dans ce tableau car, pour les quatre autres stations, l'étude des fréquences porte sur cinquante-deux années seulement (1918-1970) au lieu de cent quarante-quatre pour Gien. Or, deux fois seulement en ces cinquante-deux années, le niveau à Gien a atteint de justesse 5 m 10 en 1923 et 5 mètres en 1926.

L'étude du haut bassin montre en second lieu que, à Vieille-Brioude et à Bas-en-Basset, les débits moyens mensuels sont, dans l'ensemble, en bonne corrélation avec les crues de toutes tailles, les poussées moyennes dans les deux cas l'emportant au printemps et les accès de fièvre en automne ([20]). Au contraire, le régime des grandes crues à Gien est

([19]) Ce classement de crues correspond à peu près à celui qui a été adopté à Gien puisque les crues de plus de 5 mètres sont celles où le débit a dépassé 3.000 m^3/s, soit à peu près dix fois le module (302 m^3/s pour la période 1949-1968). La limite minimale de 3 mètres à Gien englobe peut-être un peu trop de crues secondaires puisqu'à cette cote, le débit serait d'environ 4,7 fois le module.

A Bas-en-Basset, les crues secondaires sont comprises entre 200 et 400 m^3/s de débit moyen journalier maximum,
à Vieille-Brioude, entre 145 et 290 m^3/s,
à Pont-du-Bouchet, entre 85 et 170 m^3/s,
à Giroux, entre 55 et 110 m^3/s.

([20]) Une interprétation trop rigoureuse des divergences entre les graphiques de Bas-en-Basset et de Vieille-Brioude serait peut-être hasardeuse. En effet, les prélèvements de Montpezat sur la Loire depuis 1955 amortissent régulièrement les crues d'hiver et de printemps parce que l'exploitation de la centrale, maximale en cette saison, rend le plus souvent les réservoirs d'Issarlès, de la Palisse, du Gage et de la Veyradeyre capables d'emmagasiner la plus grande partie des débits de crue. A l'automne, il pourrait en être de même mais les pluies étant généralement plus intenses, les réservoirs ne peuvent retenir qu'une petite partie des débits de crue surtout quand des averses « préparatoires » les ont remplis auparavant. Les crues moyennes d'automne sont amorties. Les grandes le sont peu. Un exemple en est donné par les deux crues successives, celle des 31 octobre-1er novembre 1963,

le résultat de combinaisons complexes sauf en automne où l'identité « méditerranéenne » des crues torrentielles ne fait aucun doute. Pendant le reste de l'année et surtout au printemps, la genèse des grandes crues peut être extrêmement variée, des concordances très diverses s'établissant entre les intumescences fortes ou faibles sur toutes les artères du bassin.

Enfin, ces anomalies à Gien du mois de juin, constituées par la discordance entre les fortes crues et les débits moyens mensuels globaux, existent aussi, très prononcées, à la même époque de mai et de juin, sur le bassin de la Sioule à Pont-du-Bouchet. Faut-il en conclure que la cause de cette discordance à Gien soit à chercher dans le seul régime de la haute Sioule dont le bassin, à la limite de celui de la Loire supérieure, s'apparente plus, par l'exposition, aux plateaux limousins et marchois qu'à la dépression intérieure du Massif Central que l'affluent se résigne à rejoindre loin à l'aval de Pont-du-Bouchet ? Dans la mesure où la Sioule est soumise au moins partiellement à des influences climatiques distinctes de celles du bassin ligérien, ce qu'elle apporterait alors à la Loire de Gien serait d'importation étrangère.

Un examen plus attentif montre toutefois que la singularité des grandes crues de mai et de juin ne transparaît ni dans la courbe moyenne du régime de la Sioule ni dans l'histogramme de ses crues secondaires. En revanche, ces crues de mai et de juin se révèlent aussi sans ambiguïté sur la Dore (figure 44 A), la Loire à Bas-en-Basset (fig. 43 A) et même l'Allier (figure 43 B). Dans le dernier cas, le fait est moins net que dans les deux premiers parce que les grandes crues sont plus précoces et suivent de trop près celles, printanières, de mars et d'avril pour s'en distinguer par une séparation tranchée. Du double fait observé sur la Sioule d'une part, la Dore, la Loire et l'Allier, d'autre part, il semble donc résulter que l'influence exercée est moins celle — « étrangère » — transmise par la Sioule à la Loire que celle du « vrai Massif Central climatique » ([21]) atteignant par intermittence la haute Sioule.

C. **Le faible concours du bassin versant à l'atténuation d'un régime excessif**

Dans le réseau hydrographique de la Loire en amont de Gien, un contraste majeur commandé par la morphologie oppose, d'une part, le chevelu dense des petites rivières souvent torrentielles, issues de hautes

complètement absorbée par Montpezat, et celle des 5 et 6 novembre qui lui succédait, amortie seulement de 15 %.

Le graphique des crues à Bas pourrait en être légèrement modifié par rapport à celui de Vieille-Brioude où les débits sont « naturels ». L'influence de Montpezat ne s'exerce que sur 202 km², soit 6,1 % du bassin à Bas-en-Basset mais c'est la partie la plus arrosée lors des épisodes de type cévenol.

([21]) cf. L. GACHON (1946).

terres cristallines, métamorphiques ou volcaniques peu ou pas perméables et, d'autre part, les deux grands collecteurs coulant, après Brioude pour l'Allier et après la confluence du Furens pour la Loire, dans de vastes bassins au cœur de la montagne puis dans les plaines d'effondrement, les uns et les autres largement ouverts et déblayés dans les dépôts détritiques tertiaires. Dans chacun de ces deux ensembles, l'action de freinage opposée par le bassin à l'écoulement des crues prend des aspects différents.

1. *La capacité d'infiltration dans les hauts bassins de la Loire et de l'Allier*

Pour essayer de connaître sur quelques bassins représentatifs l'efficacité, en chaque saison, d'averses ayant les mêmes caractères d'intensité et d'abondance, une première analyse de détail a porté sur les trois bassins de l'Allier à Lavalette, de la Seuge à Saugues et du Chapeauroux à Chapeauroux ; pendant sept années pour les deux premiers (janvier 1958 à janvier 1965) et cinq années à Chapeauroux (1960 à 1965), le rendement de toutes les averses de plus de 10 mm a été calculé ([22]). Une seconde forme d'analyse s'est ensuite appliquée à comparer, sur un plus grand nombre de bassins-témoins, des bilans de crues correspondant à quelques averses particulières.

a) **Une suite complète de bilans pour trois rivières du haut bassin**

Parmi les quatre-vingt-seize intumescences examinées sur l'Allier, les soixante-neuf sur la Seuge et les soixante sur le Chapeauroux, une distinction s'impose entre, d'une part, les crues dont le débit résulte de chutes de pluie ou de neige conjuguées avec une fusion nivale et, d'autre part, les crues d'origine purement pluviales. Pour les unes et les autres, le dépouillement dont les tableaux n[os] 55, 56, 57 rassemblent les résultats met en relief les conclusions suivantes.

— *Dispersion des coefficients d'écoulement* **(Cr)** ([23]) : au cours des crues « pluviales », ceux-ci ont pris, sur chaque bassin, les valeurs extrêmes suivantes :

à Lavalette : **0,02** à la suite d'une averse de 73 mm, les 30 septembre-1er octobre 1961, succédant à vingt jours secs, et **0,91** les 8 et 9 novembre 1963 (P = 142 mm) le bassin ayant été préalablement saturé par une averse de 157 mm les 31 octobre et 1er novembre ;

à Chapeauroux : **0,01** les 27-28 juillet 1962 (P = 10 mm) et les 26-27 juin 1964 (P = 25 mm), et **0,39** en mai 1964 (P = 126 mm) ;

([22]) Le terme d'« averse » désigne ici une période ou un épisode pluvieux qui a pu durer plusieurs jours consécutifs.

([23]) rapport du volume liquide total net de l'intumescence au volume de l'averse qui en est la cause ($\frac{P'}{P}$).

à Saugues : **0,007**, pratiquement rien, après une pluie de 34 mm en deux jours officiels, les 27 et 28 juillet 1962 — et le même coefficient après une autre averse de 31 mm au mois de septembre de la même année sèche de 1962 ; **0,29** lors de la crue de novembre 1963 (P = 73,5 mm sur le bassin en trois jours officiels) (24).

Dans le cas des crues « nivales » ou « mixtes », les coefficients d'écoulement sont plus dispersés et peuvent atteindre des valeurs beaucoup plus élevées que dans les crues pluviales pures. Ils sont parfois supérieurs à l'unité quand une averse entraîne la fusion d'une partie de la neige accumulée. Les cas sont fréquents dans cette région pourtant élevée où les six mois de saison froide sont caractérisés par des alternances de réchauffement et de refroidissement. Ainsi, au mois de février 1958, une faible averse moyenne sur le bassin, de 17 mm, par vent du sud, après quatorze jours secs, fait passer le débit de l'Allier de 6,40 m^3/s à 38 m^3/s (coefficient d'écoulement de 2,76) (25). Inversement, les coefficients sont anormalement bas pour certaines crues quand l'averse se fait sous forme de neige : ainsi, à Lavalette, du 26 février au 1er mars 1962, Cr = 0,06 pour 35 mm de précipitations ; ou bien, à Saugues, Cr = 0,09 pour deux averses neigeuses successives de 42 mm à la mi-novembre 1961.

— *Absence de connexité entre le coefficient d'écoulement et le volume d'eau précipitée* (figure 45).

Sans doute, le bassin de l'Allier qui reçoit les averses les plus fortes en volume et en intensité, enregistre les coefficients d'écoulement les plus élevés mais les averses de volumes voisins n'y donnent pas les mêmes crues. Par exemple, cinq épisodes pluvieux de même caractère apparent ont eu, sur l'Allier, des résultats différents (voir *Cr* page 176).

A priori, ni le volume d'eau tombée ni la durée (en jours officiels) de l'épisode pluvieux ne sont déterminants puisque peuvent y correspondre des coefficients d'écoulement très divers. En dernière analyse, la cause décisive de la valeur du coefficient — au moins pour ces épisodes qui n'ont rien d'extraordinaire — est l'état du bassin à la naissance de la crue. Or le paramètre qui exprime le mieux cet état initial

(24) Par comparaison, sur cette même rivière, le coefficient d'écoulement aurait été de 0,50 lors de la crue exceptionnelle du 16 juin 1951 causée par une très violente averse orageuse de 76 mm en deux heures. Cette crue détruisit quatre ponts, noya l'usine électrique de Luchadou, submergea le village de Prades au confluent avec l'Allier et laissa l'ancien lit exhaussé de 2 mètres environ au milieu du village. En appliquant le coefficient simple, $A = \frac{Q}{\sqrt{S}}$, cette crue de la Seuge à Saugues est comparable à celle de la Corrèze à Tulle (4 octobre 1960), les valeurs étant respectivement de 22,9 et de 23,4. Cf. note (52) page 196.

(25) L'eau de fusion aurait donc égalé au maximum 30 mm en supposant l'infiltration et l'évaporation nulles, ce qui est possible pour le premier phénomène mais sans doute inexact pour le second encore que l'évaporation ait pu être très faible.

Date de l'averse	*P (mm)*	*Cr*	*Débit moyen journalier maximum (m^3/s)*	*Débit moyen journalier initial (m^3/s)*
31 oct.-1er nov. 1963	157	0,39	92	1,9
29-30 septembre 1958	146	0,27	67	2,1
6-8 novembre 1963	142	0,91	205	33,6
3-6 octobre 1960	122	0,65	80	4,1
6-7 octobre 1961	108	0,27	30	1,8

du bassin, traduisant à la fois le degré de saturation par les averses précédentes et le niveau des réserves souterraines, est le débit moyen du jour qui a précédé le départ de la crue, ici Qt_o. Dans le cas de l'Allier (données extraites du tableau n° 55), pour des hauteurs de pluies d'un même ordre de grandeur, de 44 à 56 mm, les coefficients d'écoulement sont ainsi d'autant plus élevés que le débit initial l'est lui aussi.

Date de l'averse	*P (mm)*	*Cr*	*Qt_o (m^3/s)*	*Nombre de jours secs précédant l'averse*
1-6 juin 1964	56	0,40	23,8	2
26-29 septembre 1962	48,7	0,04	0,5	8
3-7 septembre 1964	45,2	0,06	1,32	2
17-19 mai 1961	44	0,10	1,7	12

— *Le déficit d'écoulement* ([26]) *renseigne utilement sur la capacité d'infiltration des trois bassins*

Lors des crues, la perte totale par évaporation et par infiltration est en meilleure corrélation avec le volume de l'averse que le coefficient d'écoulement. Le diagramme de la figure 46 montre une croissance très régulière des déficits en fonction de la pluie tombée au cours d'averses inférieures à 50-60 mm quelles qu'en soient l'intensité ou la saison. Au delà, les valeurs du déficit sont plus dispersées, surtout sur le bassin de l'Allier où plusieurs averses ont été beaucoup plus abondantes que sur les deux autres bassins. Dès lors, dans le cas de la Seuge ou du Chapeauroux où la corrélation est la meilleure mais où les précipitations

([26]) Le déficit d'écoulement est la différence entre la pluie tombée (P) et la pluie « écoulée » (P') : D = P − P'. P' qui équivaut au volume net de l'intumescence est exprimé, comme P, en lame d'eau (mm).

n'ont jamais excédé 152 mm, les averses de l'échantillon considéré auraient-elles jamais été assez copieuses pour saturer complètement leurs bassins ? Il semble bien que oui : les valeurs maximales pour les déficits d'écoulement, de 70 mm sur la Seuge et de 120 mm sur le Chapeauroux, apparaissent comme la limite grâce à laquelle pourrait être évaluée l'absorption potentielle sur ces deux bassins.

Il a déjà été dit [27] que, sur la **Seuge**, le coefficient record de 0,50 pour la crue exceptionnelle de juin 1951 avait donné un déficit d'environ 38 mm. La pluie diluvienne de 76 mm n'y aurait jamais atteint auparavant une telle intensité [28], ce qui explique en partie la faiblesse relative du déficit, mais en partie seulement, le sol ayant été préalablement imbibé d'eau par des averses survenues les jours précédents. Au cours d'averses plus longues, recensées au tableau n° 58, frappant un bassin mieux égoutté — ce dont témoignent les débits initiaux et le nombre de jours « secs » précédant l'averse — le déficit a été sensiblement plus élevé.

Il est vrai que les dates de ces averses, d'une part, et les faibles coefficients de ruissellement, de l'autre, laissent supposer que l'évapotranspiration a prélevé une part notable de l'eau précipitée. Au contraire, quand l'averse survient au mois de novembre sur un bassin de 1.135 mètres d'altitude moyenne, l'évaporation est sans doute négligeable. D'où l'intérêt des deux crues consécutives de novembre 1963 :

Date de l'averse	*P (mm)*	*D (mm)*	*Cr*	*Qt_0 (l/s/km²)*	*Qj max. (l/s/km²)*	*Nombre de jours secs précédant l'averse*
31 oct.-1er nov. 1963	64	48	0,24	4,8	93	23
6-8 novembre 1963	73	52	0,29	32,8	123	0

La capacité d'absorption qu'a le bassin de la Seuge est probablement mesurée par ces valeurs 48-52 mm du déficit d'écoulement. Elle ne semble pas pouvoir atteindre 70 mm (cf. ci-dessus).

Les mêmes observations appliquées aux déficits d'écoulement sur le bassin du **Chapeauroux** conduisent à des estimations du même ordre malgré des déficits à l'occasion plus substantiels [29] :

---

[27] note 24, page 175.

[28] Après un premier orage au cours de l'après-midi du samedi 16 juin, l'orage extrêmement violent qui a causé la crue s'est produit de 18 heures à 20 heures.

[29] En été, le prélèvement de l'évaporation doit aussi être plus fort sur ce bassin que sur celui de la Seuge. Les espaces plats et découverts où les horizons saturés d'eau affleurent largement en marécages temporaires y sont plus étendus que dans le bassin de la Seuge.

cf. profils hypsométriques sur les fiches de bassin.

124 mm en novembre 1962 pour une averse de 152 mm,
102 mm en octobre 1960 pour une averse de 143 mm,
86 mm en mai 1964 pour une averse de 126 mm,
78 mm en octobre-novembre 1963 pour une averse de 90 mm.

Cependant, pour ces quatre épisodes, la neige tombée au début de l'averse dans les parties hautes du bassin — dont l'altitude moyenne de 1.205 mètres est supérieure encore à celle du bassin de la Seuge — a-t-elle exercé une action de rétention qui aurait réduit d'autant celle de la réserve hydrogéologique ? Il est douteux qu'auxdites époques, le rôle de la neige ait été appréciable.

Enfin, la figure 46 met en pleine lumière que de beaucoup plus fortes averses ne libèrent pas le bassin de l'**Allier** de la même limite d'absorption : au delà, encore et toujours, de 50 mm précipités il n'y a plus aucune corrélation entre le volume de l'averse et le déficit d'écoulement. Celui-ci a été de :

106 mm les 29 - 30 septembre 1958 (P = 146 mm),
96 mm les 31 septembre et 1er octobre 1963 (P = 157 mm),
92 mm les 16 - 21 septembre 1960 (P = 113 mm).

Mais, que la pluie survienne après une première averse " saturante ", et le déficit d'écoulement n'a plus que des valeurs faibles ou très faibles comme dans les épisodes suivants :

Date des averses	*Pluies (mm)*	*Déficit (mm)*	*Cr*
6-8 novembre 1963	142	13	0,91
21-23 novembre 1960	76	15	0,80
20-31 octobre 1960	292	63	0,78
3-12 novembre 1962	228	82	0,64
31 octobre - 2 novembre 1968	296	62	0,79

Compte tenu de l'évapotranspiration, il ne semble pas que, sur ce bassin du haut Allier, l'infiltration dans les arènes puisse neutraliser au maximum plus de 70 à 80 mm : ce seuil est notablement plus bas que celui attribué par M. PARDE aux bassins supérieurs des rivières cévenoles, l'Ardèche, la Cèze et les Gardons, mais il est du même ordre de grandeur que pour les rivières issues des plateaux du nord-ouest du Massif Central ([30]).

([30]) Les bassins cévenols auraient pu distraire à l'écoulement, à la fin de septembre 1907, 180 à 200 mm sur 380 à 400 mm tombés en quelques jours.
cf. M. PARDE, 1950.
Lors de la crue exceptionnelle d'octobre 1960 (P = 200 mm en vingt-quatre heures vers les sources de la Vézère), le déficit d'écoulement en une semaine ou un

Les conclusions précédentes acquises pour le haut Allier, le Chapeauroux et la Seuge restent-elles valables pour le reste du bassin ?

b) **Bilans d'averses particulières sur le bassin de la Loire**

La grande disparité des coefficients et des déficits d'écoulement est un trait commun à toutes les parties du grand bassin de la Loire supérieure : suivant la saturation préalable du sol et la saison, les rendements d'averses égales sont partout très divers. Dix crues récentes sur la Sioule à Pont-du-Bouchet, dont deux « grandes » et trois « moyennes », en sont la preuve (tableau n° 59).

La crue d'août 1960 est particulièrement significative à un autre titre : le déficit n'a pas dépassé 80 mm même quand l'évaporation était forte et le sol sec ([31]). Au début du mois de septembre 1965, comme à la fin du mois de mai 1964, de fortes averses, respectivement 100 mm et 88 mm en moyenne sur le bassin, ont été suivies de déficits de 68 et 66 mm seulement. Inversement, le sol bien mouillé en avril 1964 a intercepté une très faible partie de l'averse de 44 mm puisque, dans le faible déficit de 18 mm, entrent aussi les effets de l'évaporation.

Pour des bassins de superficie plus vaste, les résultats sont voisins. Par exemple, le déficit lors de la crue du 2 novembre 1968, la plus forte survenue à Vieille-Brioude depuis 1943 ([32]), a été, pour l'ensemble des 2.260 km² versants, de 49 mm, inférieur à celui de 62 mm relevé pour l'amont de Lavalette (394 km²) où l'averse a atteint son maximum d'intensité (400 mm en quarante-huit heures à Luc, 214 mm dans le

peu plus, pour la Corrèze, la Vézère, la haute Creuse, la Tardes, a avoisiné une cinquantaine de mm à la plupart des stations où les crues ont été les plus fortes. M. PARDE estime que si le sol avait été bien moins saturé par la pluviosité anormale d'août et de septembre, le déficit d'écoulement aurait pu atteindre 80 mm et peut-être plus. Pour la Diège à Loubeix il a représenté environ 100 mm.

cf. M. PARDE, 1962.

([31]) Les violents orages des 25, 26, 27 août 1960 ont succédé à une semaine chaude et sèche (35°5 à Clermont-Ferrand).

([32]) Le débit maximum instantané y a atteint 1.050 m³/s pour une cote de 5 mètres. Cette cote a été dépassée plusieurs fois en un siècle et quart (125 ans),

		P à Langogne
en septembre 1866	: 9 m 21	349 mm
en septembre 1875	: 7 m 50	180 mm
en octobre (16) 1907	: 6 m 80	255 mm
en octobre 1872	: 6 m 55	236 mm
en octobre 1857	: 6 m 54	
en mai 1856	: 6 m 48	
en décembre 1888	: 5 m 80	
en octobre (9) 1907	: 5 m 80	181 mm
en octobre 1943	: 5 m 70	
en novembre 1968	: 5 m	214 mm

même temps à Langogne) mais où des pluies antécédentes, les 24 et 25 octobre, avaient déjà imprégné les terrains (33).

TABLEAU N° 60

AVERSE ET CRUE DU 2 NOVEMBRE 1968 SUR LE HAUT ALLIER

Station	*Superficie du bassin (km²)*	*Qj max. (m³/s)*	*Qt_0 (m³/s)*	*P (mm)*	*$\frac{Cr}{\frac{P'}{P}}$*	*D (mm)*
Lavalette	394	350	7,8	296	0,79	62
Vieille-Brioude	2.260	550	18,1	97	0,50	49

Le copieux épisode pluvieux du 24 au 28 mai 1964 (tableau n° 61) durant lequel, en deux averses successives, 119 mm en moyenne se sont déversés à l'amont de Vieille-Brioude et 102 mm sur les 6.740 km² de bassin entre Vieille-Brioude et Billy, a donné lieu à des déficits respectifs de 80 mm et 73 mm. Depuis dix jours, il n'avait plu en aucune station du bassin.

La relative unité de comportement hydrologique du bassin pendant les crues se manifeste encore par une constance des déficits d'écoulement d'un bout à l'autre du bassin lors d'averses généralisées. La crue de mai 1965 en donne l'illustration :

TABLEAU N° 62

BILANS DE LA CRUE DU 19 AU 23 MAI 1965 SUR LE BASSIN DE LA LOIRE

date de la pointe de la crue	*Qj max. (m³/s)*	*station*	*P (mm)*	*P' (mm)*	*$\frac{Cr}{\frac{P'}{P}}$*	*D (mm)*
19 mai	7,1	Lavalette	39	2,4	0,06	36,6
19 mai	171	Vieille-Brioude	49	19	0,39	30
19 mai	143	Bas-en-Basset	48	11	0,23	37
19 mai	71	Giroux (Dore)	62	25	0,40	37
19 mai	87,5	Pont-du-Bouchet	50,5	16,7	0,33	34
19 mai	44	Joursac	58	23	0,40	35
20 mai	530	de Vieille-Brioude à Billy St Yorre	54	20	0,37	34

(33) Pour une averse de 80 mm, le déficit avait été de 63 mm et le coefficient de ruissellement de 0,20.

Le déficit de 30 à 37 mm est remarquablement stable en dépit de coefficients d'écoulement très variables d'un bassin à l'autre (Cr = 0,40 sur l'Alagnon en amont de Joursac pour 321 km², et 0,06 sur le bassin de l'Allier en amont de Lavalette pour 394 km²).

De même, le bilan de la crue des 6 et 8 septembre 1965 se solde par un déficit de

57 mm à Vieille-Brioude	(2.260 km²),
64 mm de Vieille-Brioude à Billy	(6.740 km²),
56 mm à Bas-en-Basset	(3.300 km²),
53 mm de Bas-en-Basset à Villerest	(3.320 km²),
66 mm à Pont-du-Bouchet	(1.170 km²),
66 mm à Joursac	(321 km²),

pour des averses moyennes qui varient de 58 mm en amont de Bas-en-Basset à 100 mm sur le bassin de la Sioule.

Il semble donc bien que, sur le bâti montagneux, les différences de mise en réserve potentielle entre les bassins élémentaires comptent finalement assez peu en regard des conditions météorologiques particulières dont l'influence uniformisante s'impose à l'entier bassin lors des averses généralisées.

2. *La capacité d'infiltration dans les plaines alluviales*

La sortie de la montagne ne calme guère les impétuosités de la Loire et de l'Allier : dans les plaines qu'ils parcourent, les crues se propagent sans s'apaiser, semble-t-il. Le rôle exact de l'épais manteau alluvial, éminemment perméable, dans lequel les rivières ont façonné leur lit a été mis en évidence par deux séries de recherches sur les échanges existant entre le fleuve et sa nappe alluviale.

Les premières études systématiques ont été faites de 1912 à 1952, entre La Charité et Châtillon-sur-Loire, par les services techniques des Eaux de la Ville de Paris. Puis, de 1955 à 1960, EDF a repris cette documentation et étendu les mesures piézométriques jusqu'à la plaine du Forez à cinq kilomètres au sud de Feurs, d'une part, et sur l'Allier, d'autre part, jusqu'aux environs de Puy-Guillaume en Limagne (figure 47 A) ([34]).

Quels que soient les débits et les lieux, aussi bien en amont qu'en aval de la Loire et de l'Allier, les eaux de la nappe se dirigent vers la rivière. Les courbes de niveau indiquant les profondeurs des surfaces phréatiques ont une forme régulière avec pente oblique vers l'aval : la nappe, alimentée par les faibles apports souterrains des bordures et surtout par les pluies tombant sur la plaine, nourrit ordinairement la rivière (figure 47 B). C'est seulement en périodes de crues que ce processus

([34]) F. DIENERT (1913), F. DIENERT et P. ETRILLARD (1913), R. GRICOURT-MAGNIEN (1922), F. DIENERT (1926) (1927) (1928), M. ARCHAMBAULT (1961).

normal de déversement s'inverse et que la nappe devient dépendante de la rivière.

A l'occasion des crues étudiées, de taille moyenne ([35]), ont été déterminés les débits susceptibles de passer du fleuve dans la nappe ainsi que la vitesse de retour à la rivière des eaux momentanément emmagasinées dans les alluvions. La distance d'influence de la rivière en crue dépend de plusieurs facteurs : pente de la nappe avant la crue, dénivellation et rapidité de la montée des eaux dans la rivière, et surtout perméabilité des terrains. Les premiers de ces facteurs apparaissent clairement dans la figure 47 C qui, avec la crue du 16 janvier 1947, donne un exemple simple des effets du flot sur le profil de la nappe alluviale dans la région de Châtillon-sur-Loire. Quant à la perméabilité, elle est partout élevée dans le Val : le coefficient de Darcy est voisin de $K = 1 \times 10^{-3}$ m/s, la porosité de l'ordre de 20 à 25 %. Des nombreuses observations, il résulte que l'action des crues sur la nappe s'étend ordinairement à quelques centaines de mètres seulement du chenal. Lors de la décrue, la bonne perméabilité assure un retour rapide à la rivière, en quelques jours, si la baisse de celle-ci est rapide. Le volume d'eau déversé dans la nappe est évalué par le procédé d'un schéma empirique construit à partir des observations faites sur les lieux. En coupe, l'accroissement de la surface mouillée imputable à la crue est assimilé à un triangle dont la base, dans le sens horizontal, serait de 1.000 mètres (la distance moyenne d'influence de la rivière) et dont la hauteur serait la dénivellation atteinte par le flot en crue. La surface de ce triangle multipliée par le coefficient de porosité et par la longueur de la portion de rivière alimentant la nappe donne le volume d'eau absorbé par la nappe. Si la crue a fait monter la cote de 1 mètre par exemple, la quantité passée dans la nappe pour un kilomètre de val est de :

$$\frac{1}{2} \times 1.000 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0{,}20 \times 1 \text{ km} = 100.000 \text{ m}^3$$

(0,20 est le coefficient de porosité)

([35]) Ce sont :

— la crue du 16 janvier 1947 qui a élevé le plan d'eau, au profil de Sury entre Cosne et Briare, de 1 m 70 entre le 11 et le 16 janvier ; la descente, du 16 au 23, a été de 1 m 10 ; le débit moyen journalier maximum a été de 804 m³/s le 16 juin à Gien ;

— la crue du 25 novembre 1949, au même endroit, qui a fait monter la cote de 2 m 20 du 9 ou 25 novembre (Qj max : 520 m³/s à Gien) ; le 10 décembre, les eaux étaient redescendues un mètre plus bas que le 25 novembre, au maximum de l'intumescence ;

— la crue des 21-22 janvier 1955 (Qj max. à Gien : 1800 m³/s),

— la crue du 13 février 1955 (Qj max. à Gien : 1850 m³/s),

— la crue des 24-25 juin 1955 (Qj max. à Gien : 180 m³/s),

— les petites crues successives de décembre 1955 et janvier 1956,

— la crue du 28 février 1957 (Qj max. à Gien : 1950 m³/s),

— la crue du 25 décembre 1958 (Qj max. à Gien : 1550 m³/s).

Les phénomènes ne sont pas toujours aussi simples car il arrive que la propagation de l'eau vers la nappe soit gênée. Le premier effet de la crue est, en effet, d'interrompre le rôle de drain que joue la rivière à l'égard de la nappe. La zone de draînage se trouve déplacée et deux gouttières parallèles à la rivière se forment à quelques centaines de mètres au maximum. La seconde source de complications vient des oscillations de la rivière, qui peuvent faire interférer dans la nappe les ondes de crue et de décrue. Enfin, la nappe peut être alimentée pendant la crue même de pluies plus ou moins abondantes sur la plaine, ce qui provoque une montée de son niveau et une imbibition du sol qui fait obstacle à toute autre absorption.

Le rôle ainsi évalué de la nappe alluviale dans l'amortissement d'une crue a été vérifié ici de façon probante dans le cas de la grande crue du début du mois de novembre 1968 sur le haut Allier. Seules les marges méridionales du bassin furent copieusement arrosées les 31 octobre, 1er et 2 novembre, les pluies diminuant rapidement à l'aval, surtout sur le versant de rive gauche de la rivière. A Vieille-Brioude, l'Allier cota 5 mètres mais à Parentignat (près d'Issoire), au seuil de la Limagne, les eaux montèrent seulement de 0 m 20 le 31 octobre à 3 mètres le 2 novembre (dénivellation au sens indiqué à la page précédente : 2 m 8) ; à Moulins le niveau monta de -0 m 003 le 3 novembre à 0 m 84 le 5 novembre (dénivellation : 0 m 84) et, au Guétin, de 0 m 16 le 2 novembre à 1 m 06 le 5 (dénivellation : 0 m 90). La baisse des eaux fut également très rapide : à Parentignat, cinq jours après la crue, le niveau était redescendu de 3 mètres à 0 m 60. Le volume net écoulé à Vieille-Brioude a été d'environ 108.945.000 m^3. A Saint-Yorre ([36]), il n'était plus que de 105.235.000 m^3. Or, entre les deux stations, les apports nets de l'Alagnon (2.073.000 m^3), de la Dore (7.160.000 m^3) et des Couze (1.088.000 m^3) auraient dû, au contraire, augmenter le volume de la crue. Donc le « déficit » à Saint-Yorre pour les sept jours qu'a duré le phénomène serait au minimum de 14.120.000 m^3.

Suivant la méthode des ingénieurs de l'E.D.F., l'absorption de la nappe se détermine ainsi : entre Parentignat et Saint-Yorre, la distance est de 90 kilomètres. Les dénivellations notées à Parentignat (2 m 80), d'une part, et à Moulins (0 m 80), d'autre part, autorisent à prendre comme montée moyenne de l'Allier la hauteur de 1 m 50 de sorte que le volume d'eau déversé de la rivière dans la nappe est de l'ordre de :

$$\frac{1}{2} \times 1.000 \text{ m} \times 1{,}5 \times 0{,}20 \times 90 \text{ km} = 13.500.000 \text{ m}^3,$$

([36]) Depuis le 1er janvier 1967, l'enregistreur de Saint-Yorre est utilisé par la Circonscription Electrique Centre et Ouest et le Service Hydrologique Centralisateur, de préférence à celui de Billy. La faible différence de bassin versant entre les deux stations permet heureusement d'utiliser encore les moyennes de références de Billy, station exploitée de 1955 à 1966.

soit une valeur très proche du « déficit » précédemment constaté à Saint-Yorre.

Continuant son parcours, la crue atteint Le Guétin avec un volume net de 112.665.000 m³. En ajoutant au volume écoulé à Saint-Yorre l'apport net de la Sioule à Saint-Pourçain (17.250.000 m³) ([37]), il aurait dû s'écouler 122.485.000 m³ au lieu de 112.665.000 m³ enregistrés. La différence est de 9.820.000 m³. Elle correspond à peu près à ce qui aurait pu être emmagasiné provisoirement par la nappe, soit, selon la formule des ingénieurs de l'EDF,

$$\frac{1}{2} \times 1.000 \text{ m} \times 0{,}90 \times 0{,}20 \times 116 \text{ km (de St-Yorre au Guétin)} = 10.440.000 \text{ m}^3.$$

Cette crue offre un cas très pur d'aplatissement par l'effet dominant de la nappe, l'évaporation étant, au mois de novembre, relativement réduite. Mais il est à noter aussi que le coefficient d'écoulement de la crue aurait pu être supérieur à ce qu'il a été en amont de Lavalette (0,79) et surtout pour le bassin de Vieille-Brioude (0,50) si une averse précédente avait préalablement imprégné le terrain. En outre, l'infiltration dans la nappe a été maximale, aucune pluie n'étant intervenue dans la plaine dans les deux ou trois jours qui ont suivi l'averse cévenole des 31 octobre et 1er novembre. Il est certain que cette crue de 1968 aurait pu avoir la taille de ses devancières de septembre 1875 et des 23 et 24 octobre 1943 qui sont bien, à l'origine, de même type, s'il s'était déversé autant d'eau en aval de Vieille-Brioude (tableau n° 63).

TABLEAU N° 63

PRECIPITATIONS SUR LE BASSIN DE L'ALLIER A L'AVAL DE VIEILLE-BRIOUDE LORS DES CRUES DE SEPTEMBRE 1875 ET OCTOBRE 1943

région de Vieille-Brioude	178 mm	120 mm
département du Puy-de-Dôme	120 mm	110 mm
région bourbonnaise	95 mm	80 mm
moyenne	130 mm	100 mm

Finalement, pendant la crue de 1968, la nappe a pu soustraire momentanément à l'Allier environ 13 % de son volume net à Vieille-Brioude. Et si, pour la décrue, il est adopté comme vitesse de propagation dans la nappe, en moyenne, 115 à 120 l/s, le retour de cette eau à la rivière

([37]) Les rivières drainant les 2.900 km² non jaugés entre la confluence de la Sioule et le Guétin n'ont aucunement été touchées par la crue.

s'est fait en quatorze ou quinze jours. Même quand le volume d'eau qui a alimenté la nappe est beaucoup plus élevé, sa restitution est relativement rapide à cause de la perméabilité des alluvions. Les hautes eaux et crues de janvier et février 1955 n'ont eu d'effet que pendant un mois ou un mois et demi sur la plupart des profils observés le long de la Loire et n'ont pas empêché un étiage assez bas l'été suivant (cf. tableau n° 43 et figure 38). Le niveau de la nappe alluviale ne dépend pratiquement pas des crues qui ont pu survenir plus de quelques jours avant l'instant d'observation mais essentiellement du niveau de la rivière à cet instant.

3. *Conclusion sur le rôle du bassin dans l'atténuation des crues*

Dans les plaines comme dans la montagne, le bassin amortit donc faiblement les sursauts de la Loire et de l'Allier. Les conditions météorologiques y agissent de manière pareillement déterminante dans la genèse des crues :

— l'abondance des pluies généralisées est toujours à l'origine des fortes crues ;

— mais la fréquence et l'intensité des averses sont surtout dangereuses, même à partir de 40 ou 50 mm, si l'intervalle de temps qui les sépare n'excède pas huit jours ;

— enfin l'évaporation peut neutraliser, en été, l'effet de pluies qui seraient catastrophiques en hiver. Les crues des 1-2 août 1968, des 1-6 septembre 1965, et surtout celle du 31 août 1960 en offrent plusieurs exemples. La dernière citée a suivi, sur le Bourbonnais et le Charolais, des orages exceptionnels par leur extension et l'intensité des averses qui ont atteint 50 mm en quelques heures en plusieurs postes pluviométriques et jusqu'à 66 mm à Saint-Yorre le 27 août. La pluie moyenne, sur les 11.855 km² du bassin qui s'étend entre Villerest et Nevers, a été de 69 mm en trois jours officiels. Le déficit d'écoulement a été de 66 mm, le coefficient d'écoulement de 5 % et l'eau est montée en trois jours, à l'échelle de Nevers, de 0 m 20 à 0 m 64 seulement. En hiver, avec un coefficient d'écoulement de 35 à 40 %, la même averse aurait certainement décuplé le volume net écoulé à Nevers.

Que les conditions météorologiques soient d'un poids déterminant dans la naissance et le développement des crues explique l'extrême variété de celles-ci. Non seulement les influences climatiques décisives s'exercent sur un bassin étendu et morphologiquement contrasté mais les types de temps générateurs d'averses peuvent se succéder très vite en un même lieu. Pour le bassin parisien, P. PEDELABORDE (1957) a pu établir que la durée d'un même type de temps peut être de un à dix jours et qu'en moyenne, un ou deux jours représentent les durées habituelles de la plupart des types. Le rythme n'est certainement pas très différent sur le Massif Central. C'est dire qu'il est fort rapide pour un bassin qui oppose une faible puissance d'inertie aux caprices du climat.

II. LES CAUSES PLUVIALES DES CRUES

Dans le cas d'averses assez fortes pour provoquer des crues, le rôle du bassin versant, quand il est faible comme c'est le cas à maintes stations du domaine étudié, est illustré avant tout par l'étroite correspondance entre la forme des hydrogrammes et celle des hyétogrammes dont la figure 48 donne un exemple. Le profil de la crue dépend essentiellement de l'abondance et de l'intensité de la pluie ; son dessin reproduit les moindres variations d'intensité relevées pendant les différentes phases de l'épisode pluvieux. En aucun lieu, la structure physique du bassin ne le laisse prélever assez d'eau pour imposer à toutes les crues, quelle qu'en soit l'origine pluviale, un même style d'écoulement.

Faible, le rôle du bassin versant n'est pourtant pas nul. Si la propagation du flot de crue obéit principalement à la puissance et à l'intensité de l'averse, la vitesse de translation est néanmoins influencée par la pente du talweg, la forme du lit, la largeur de la vallée. Enfin, la configuration immuable des diverses branches, petites et grandes, du réseau hydrographique dicte un certain degré de concordances et de combinaisons des flots élémentaires que peuvent, il est vrai, perturber des inondations sur l'une des branches concordantes. En cas de crue consécutive à une seule averse touchant un seul « jeu » d'intumescences, les mécanismes sont bien réglés comme par un programme : ainsi, au Bec d'Allier, l'affluent est en avance sur la Loire comme le veulent la morphologie et le tracé du réseau. Cette discordance a été relevée par les premiers observateurs de l'hydrologie ligérienne au XIXème siècle, SAINJON et COMOY, puis rappelée par des auteurs plus récents, L. GALLOUEDEC (1910), H. ONDE (1923), R. DION (1934). Mais, d'une part, les averses monogéniques sont très rares et, d'autre part, sur le cours inférieur, la superposition est peu fréquente de flots élémentaires résultant d'averses distinctes. La plupart des grandes crues sont polygéniques et l'influence des facteurs morphologiques fixes ne fait que multiplier la diversité des phénomènes. Ainsi, à la confluence des deux rivières, l'avance naturelle de l'Allier sur la Loire est le plus souvent réduite, annulée ou inversée par les décalages et les complications météorologiques. La crue du 13 novembre 1958 (Qj max : 1250 m^3/s à Gien), par exemple, fut la conséquence à la fois de pluies modérées aux confins sud-orientaux des bassins, et d'averses copieuses sur la Limagne et le Forez tandis que le Morvan fut arrosé un jour plus tôt. Cette fois, le flot de la Loire s'est présenté, au Bec d'Allier, avec six heures d'avance sur celui de l'Allier. Le 27 mai 1958, ce sont encore les affluents morvandiaux qui furent à l'origine des seize heures d'avance de la Loire sur l'Allier. Les inégalités en volume et les discordances dans le temps des deux

ondes au Bec d'Allier sont donc irrégulières (M. PARDE, 1964 b — M. DACHARRY, 1969).

Il est logique qu'à la lumière de telles observations l'idée se soit fait jour, pour finalement s'imposer, d'un classement des crues fondé essentiellement sur le critère pluvial : il pouvait être un fil d'Ariane en ce labyrinthe de phénomènes irréguliers et donner le moyen de les ordonner, de les comprendre, de les prévoir.

A. Le classement des crues : typologie explicative et typologie descriptive

1. *La typologie « classique » explicative*

Dans un effort d'élucidation des mécanismes météorologiques, MAURICE PARDE (1964 b) a donné la synthèse la plus scientifique des diverses typologies « génétiques ». Elle repose sur la localisation des averses et l'origine immédiate des vents pluvieux donnant naissance aux crues

« méditerranéennes » ([38]),
« océaniques »,
« mixtes ».

a) Les crues **méditerranéennes** sévissent sur la Loire et l'Allier supérieurs quand les vents pluvieux de sud et de sud-est, heurtant la barrière cévenole et vivaroise, déversent, même au-delà du faîte et surtout par les brèches du haut Allier, de la Loire ardéchoise et du Lignon supérieur, des précipitations massives, soudaines et souvent répétées à quelques jours d'intervalle. Elles peuvent se manifester en toutes saisons mais elles atteignent cependant un maximum de fréquence et de violence en automne lorsque les gradients thermique et hygrométrique, à basse ou haute altitude, sont les plus forts entre les masses d'air affrontées : les unes plutôt fraîches, de provenance initialement océanique, les autres très humides et tièdes d'origine méridionale ou méditerranéenne, d'où le déclanchement de mécanismes frontaux et de courants perturbés de direction méridienne ou quasi-méridienne. Suivant la position des centres d'action atmosphériques qui font varier l'angle d'incidence des vents pluvieux sur le relief et donc l'extension des plus fortes précipitations, G. STARON (1971) a pu identifier trois sous-types sur le bassin de la Loire en amont de Bas-en-Basset. Il distingue, en effet :

— les pénétrations méditerranéennes de sud-ouest, « confuses », rares, générales et peu violentes donnant naissance à des crues moyennes sur la Loire : elles peuvent davantage toucher l'Allier et s'apparentent au

([38]) M. PARDE a bien mis en garde contre une interprétation trop stricte de ce terme « méditerranéen » qui pourrait faire croire au rôle exclusif de la Méditerranée dans la genèse des pluies ainsi dénommées (PARDE, 1964 b, pages 82 et 83).

type « biterrois » de P. ESTIENNE (1956) ou même à un certain type extensif méditerranéen de M. PARDE, caractérisé par un champ d'action beaucoup plus vaste que dans les crues cévenoles pures et un maximum d'intensité décalé vers le sud-ouest ([39]) ;

— les pluies méditerranéennes « de franc sud » très peu extensives qui engendrent des crues peu abondantes, sporadiques et violentes ;

— les pluies de sud-est génératrices des plus grandes crues.

Toutes les crues méditerranéennes sont caractérisées par une ascension subite des rivières et une décroissance presqu'aussi rapide. La Loire dont le bassin vellave forme comme une cuvette monte avec une rapidité comparable à celle des torrents cévenols. Le 8 octobre 1878, à Goudet, de 7 heures à 10 heures et demie, l'eau s'élève de douze mètres. A La Voulte, elle passe de la cote de 2 mètres à la cote de 6 m 75 en quatre heures et la durée totale de la crue dure neuf heures seulement... (M. PARDE, 1919). Au Pertuiset, en octobre 1846, la crue commence le 17 à 6 heures du matin ; à midi, les eaux sont à 6 mètres ; à 6 heures du soir, elles atteignent le maximum de 14 m 55 et s'y maintiennent pendant une heure et demie seulement.

Enfin, si ces crues ne sont pas soutenues par les apports d'affluents en aval, elles s'affaiblissent rapidement. De cet aplatissement, la crue de novembre 1968 sur l'Allier a donné un bon exemple ([40]).

b) Les crues **océaniques** pures qui jouent un très grand rôle dans le régime de la Loire inférieure ne sont pas inconnues dans le cours moyen. Elles se produisent principalement sur les affluents qui se jettent dans la Loire entre Digoin et Nevers et, de ce fait, ne sont jamais graves avant les confluents du Cher et surtout de la Vienne. Elles surviennent en saison froide, telle la crue de février 1889 dont MAZOYER donne la description suivante : « La crue qui ne s'est élevée que de trois mètres à Nevers a été une crue d'affluents causée par le vent d'ouest et qui nous a surpris en effet à Nevers par sa rapidité. La Loire a atteint son maximum le 16 février à 10 heures du matin, avant même que l'on ait reçu aucun avis spécial des postes d'observation situés sur les affluents » (M. MAZOYER, 1890).

c) Les crues les plus fréquentes et les plus graves constituent aussi le groupe des crues **mixtes** imputables à la composition des deux causes précédentes suivant tous les dosages possibles. Déclenchées par des pluies variées, simultanées dans diverses parties du bassin, ou très rapprochées dans le temps, elles donnent les cas de concordances les plus complexes et les plus dangereuses. Sur les cent crues recensées

([39]) La crue des 1-3 mars 1930 et celle d'octobre 1960 en donnent deux exemples décrits par M. PARDE (1930, 1962).

([40]) cf. ci-dessus, page 183.

par MAZOYER de 1852 à 1888, soixante-huit sont classées comme « crues d'affluents » et, parmi les trente-deux attribuées à la « haute Loire seule », la majorité ne relèvent pas de la pure espèce méditerranéenne. La nomenclature de H. ONDE pour les principales crues de l'Allier est plus précise : sept seulement des quarante-neuf crues sont « océaniques » ([41]) ; deux sont dites, sans autre précision, de « temps orageux » ; treize seulement sont « cévenoles » et vingt-sept crues « mixtes » appartiennent à cette large catégorie aux nuances nombreuses et aux limites indécises. Or, « pour les causes atmosphériques des pluies méditerranéennes très extensives ([42]) ou des grandes averses mixtes océanico-méditerranéennes, on est encore assez mal fixé... » dit M. PARDE et, plus loin : « ...nous voilà toujours enchaînés au boulet si peu maniable que nous traînons dans ce texte depuis le début de notre examen relatif à l'étude des crues. Il s'agit de phénomènes extensifs imposants, plus ou moins complexes et pas faciles à désigner ni à expliquer, à savoir des crues très fortes depuis les cours supérieurs de l'Allier et de la Loire et donc, par définition, méditerranéennes en ces secteurs, puis renforcées au delà par des apports d'affluents vigoureux, au moins (octobre 1846) jusqu'au Bec d'Allier, et parfois (mai-juin 1856) par le Cher, la Vienne et même la Maine... » (M. PARDE, 1964 b, pages 84 et 117-118).

Le critère pluviométrique se trouve ici en défaut. Force est donc, au moins provisoirement, de revenir de la typologie « explicative » à la typologie « descriptive » pour, ensuite, analytiquement, en examiner la cause pluviale.

2. *La typologie « descriptive »*

Les crues graves à Gien sont toutes des crues « mixtes ». Les plus remarquables d'entre elles sont malheureusement anciennes ([43]). Il faut donc s'accomoder d'une documentation pluviométrique à la fois fragmentaire et imprécise pour quelques évènements anciens, puis très complète pour les crues récentes, beaucoup plus modestes mais nombreuses, contrairement aux premières.

A l'échelle près, il est probable que ces crues moyennes et l'enchaînement de leurs effets sont semblables à ceux qui ont déterminé les cataclysmes anciens. Mais, pour comparer ces phénomènes les uns aux autres, il faut un critère commun suffisamment sûr. Les données hydrométriques seules s'y prêtent parce que l'observation de la marche des crues et de leurs formes, elles-mêmes modifiées soit par le simple écoulement soit par l'apport des grands affluents, a été menée continûment depuis les grandes catastrophes de 1846, 1856, 1866. Elles

([41]) 30-31 mai 1856, 11-12 juin 1879, 9 janvier 1879, 18-21 mars 1901, 30-31 mars 1902, 11-13 février 1904, 17-18 février 1904.

([42]) à rapprocher des « pénétrations *confuses* de sud-ouest » de G. STARON !

([43]) cf. tableau n° 64.

permettent d'établir, au terme d'un premier inventaire général, un classement en fonction du type d'évolution des crues de l'amont vers l'aval du bassin.

Toutefois, comme l'information relative aux hauteurs d'eau est imprécise, lacunaire et très dispersée (44), l'autre source de documentation que constituent les débits moyens journaliers depuis qu'ils sont régulièrement calculés a été utilisée conjointement de la manière suivante. Tout d'abord, les modules « globaux », relatifs à quelques stations du réseau et dont le premier en amont est pris pour base, ont permis d'établir une grille d'indices représentant la croissance « normale » des débits. Ainsi, sur la Loire, en cinq lieux d'observation, la station de Chadrac étant prise comme référence de tout le système, modules et indices ont les valeurs suivantes.

Stations	*Module* (m^3/s)	*Indice de croissance « normale » des modules*
Chadrac	20	100
Bas-en-Basset	41,1	200
Villerest	67	335
Digoin	89	445
Nevers	177	885

Puis, de la même manière, ont été calculés les indices correspondant aux débits journaliers maxima de crues. Quelques exemples en sont donnés au tableau n° 65. En novembre 1963, les débits moyens journaliers maxima et les indices correspondants ont été respectivement de

Débit moyen journalier max. (m^3/s)	*Station*	*Rivière*	*Indice de croissance*
406	Chadrac	Loire	100
725	Bas-en-Basset	Loire	180
1120	Villerest	Loire	220
865	Digoin	Loire	210
645	Nevers	Loire	160
205	Lavalette	Allier	50
456	Vieille-Brioude	Allier	112
485	Vic-le-Comte	Allier	120
430	Billy	Allier	106
351	Pont-du-Guétin	Allier	87

(44) cf. première partie, chapitre I.

Le rapprochement des deux séries suggère immédiatement trois remarques.

1°) La crue apparaît relativement égale sur les deux rivières puisque à l'amont, le rapport des indices (Chadrac : 100 et Lavalette : 50) est exactement le même que celui des modules.

2°) La crue est vite et fortement atténuée sur les deux artères en valeur relative (par comparaison avec les indices de croissance « normale » des débits) comme en valeur absolue puisqu'après Villerest, sur la Loire, et Vic-le-Comte, sur l'Allier, les valeurs indiciaires décroissent.

3°) Cette crue est différente, enfin, d'autres crues du même type (celle de novembre 1968, par exemple, proportionnellement plus forte sur l'Allier que sur la Loire : indice à Lavalette 87 au lieu de 50 en 1963) ou de crues ayant un style d'évolution inverse, celle de décembre 1968, notamment, faible à l'amont et croissant régulièrement vers l'aval.

Une telle méthode, purement descriptive et hydrométrique au départ, fut naguère adoptée par l'Ingénieur des Services de la Loire, Paul Guillon, au début du XIXème siècle, dans la grande œuvre qu'il entreprit sur les crues de la Loire en vue de « mieux élucider les circonstances météorologiques dans lesquelles se produisent les crues » (45). Ce fin connaisseur de la Loire a laissé dans ses papiers manuscrits une ébauche de classement des crues suivant le pur critère hydrométrique. Celui-ci s'est révélé assez pertinent pour servir ici de schéma directeur.

Huit types de crues y sont distingués (46) :

— crues limitées à la haute Loire seule ou très prépondérantes sur ce fleuve,

— crues touchant la haute Loire seule et le haut Allier,

— crues de la haute Loire et du haut Allier mais plus fortes sur l'Allier,

— crues de la haute Loire et du haut Allier s'étendant à tous les affluents du haut bassin,

---

(45) Ce grand dessein ne fut, hélas, jamais achevé puisque le petit cahier manuscrit est resté vierge après les pages d'introduction qui précisent le projet.

« Cette étude des crues ne devait d'abord s'appliquer qu'à la Loire et à ses affluents, écrit l'auteur, ...mais nous avons été amenés à étendre cette étude aux crues des bassins voisins, Seine, Saône, Ardèche, Lot, Dordogne, Charente, qui coïncident souvent avec celles de la Loire. Puis nous avons été entraînés à étendre encore cette étude à presque toutes les rivières de France et, enfin, aux rivières descendant des Alpes en Suisse ou en Italie » !

Après ces élargissements successifs du champ d'étude, il n'est pas étonnant que l'ouvrage n'ait jamais vu le jour !

cf. legs GUILLON. Fonds non classé de la Bibliothèque d'Orléans. Dossiers manuscrits n° 1.886, folios 310-735.

(46) Pour six de ces catégories, l'auteur cite quelques dates, toutes comprises entre 1836 et 1900.

— crues généralisées de la haute Loire et du haut Allier s'étendant aussi au Cher, à l'Indre et à la Creuse,

— crues augmentant d'importance en descendant vers l'aval pour la Loire supérieure seule,

— crues augmentant d'importance en descendant vers l'aval pour la Loire, l'Allier et légèrement pour le Cher,

— crues augmentant d'importance en descendant vers l'aval pour la Loire, l'Allier, le Cher, l'Indre et la Creuse.

Les termes « hauts bassins de la Loire et de l'Allier », d'une part, et « aval », d'autre part, appellent évidemment une précision. P. GUILLON s'est exprimé indirectement sur ce point dans une autre note également manuscrite. La plupart des crues des hauts bassins s'atténuent rapidement, écrit-il, « sur la Loire au moins à partir de Digoin et sur l'Allier au moins à partir de Parentignat. Il en résulte qu'en comparant les hauteurs de l'Allier à Moulins à celles de la Loire à Digoin, COMOY compare les crues en un point où elles sont déjà très atténuées, et en un point où elles le sont beaucoup moins, ce qui fausse absolument la comparaison. Il faudrait comparer Parentignat et Roanne ». Les stations de jaugeage actuelles voisines de ces « échelles » anciennes sont :

— Vic-le-Comte sur l'Allier (bassin versant de 5.380 km^2 après les confluences de l'Alagnon et des Couze),

— et Villerest sur la Loire (bassin versant de 6.520 km^2).

Incontestablement, ces lieux, sur les deux rivières, sont d'« aval » puisque l'apport des affluents d'aval peut s'y manifester ou non par un renforcement du flot sur l'artère maîtresse ou par un affaiblissement de l'intumescence. Au contraire, les secteurs franchement d'« amont » pour les deux rivières s'étendent au-dessus de Bas-en-Basset (3.300 km^2) et de Vieille-Brioude (2.260 km^2) qu'atteignent la Loire et l'Allier après avoir parcouru respectivement 144 km et 142 km.

B. **Les grands types d'évolution des crues et les circonstances météorologiques dans lesquelles elles se produisent**

Le voilà bien ce « monde extrêmement varié d'évènements et de causes, de types et d'exceptions » dont parle M. PARDE. Sans compter les variantes qu'introduisent la taille, la saison d'occurence et le débit initial à l'intérieur de chaque type, la nomenclature de P. GUILLON distingue déjà huit catégories ! Sous chacune d'elles, quelques crues exemplaires sont recensées au tableau n° 66. Sans qu'il soit nécessaire de reprendre ici l'analyse détaillée de ces crues, ce tableau appelle trois observations principales.

La première concerne le nombre et la variété des types purement

hydrométriques au sujet desquels la question se pose des situations météorologiques originales qui leur correspondent ou non.

La seconde remarque porte sur les modifications auxquelles les débordements sont sujets au cours de leur cheminement vers l'aval. En effet, les crues limitées aux hauts bassins, même quand elles sont exorbitantes comme celle d'octobre 1878 sur la Loire ou celles de septembre 1875 et de novembre 1899 sur l'Allier (880 mm de pluie en deux jours à Villefort), n'arrivent jamais fortes à Gien sans le secours d'affluents ; aucune crue des trois premières catégories n'y a atteint 4 m 50. En revanche, toutes celles qui sont fortes à Gien sont déjà, à quelque type qu'elles appartiennent, des intumescences non négligeables à Vieille-Brioude et à Bas-en-Basset. Dès lors, y a-t-il une ou des causes déterminant le renforcement vers l'aval ?

Enfin, la dernière remarque porte sur la fréquence et l'originalité des plus fortes crues à Gien. Leur rythme y est apparu, en effet, en nette discordance avec celui des intumescences « moyennes » qui donnent au régime ses traits « normaux » (figure 42). Des circonstances météorologiques remarquables, localisées et saisonnières expliquent-elles cette concentration des fortes crues en mai-juin, d'une part, et au début de l'automne, d'autre part ?

1. *Le problème de la correspondance entre types de crues et types de situations météorologiques*

Le problème peut être posé de deux manières. A chaque type de crue correspond-il une situation météorologique particulière ? Ou bien : une même situation météorologique donne-t-elle toujours le même type de crue ?

On peut essayer de répondre à l'une et à l'autre des questions en examinant le cas le plus simple, celui des crues monogéniques « cévenoles », illustrées par les trois premières catégories de P. GUILLON.

a) Les causes pluviales des phénomènes hydrologiques limités aux hauts bassins relèvent de situations météorologiques à peu près identiques, en surface et en altitude, qui sont aujourd'hui bien connues et bien expliquées. A l'ouest d'une aire de hautes pressions immobilisées sur l'Europe centrale, une zone dépressionnaire couvrant l'est atlantique, de l'Islande au Portugal, ou encore une dépression sur la Méditerranée occidentale dirigent un courant de sud chaud et instable de l'Afrique du Nord à la France. L'instabilité est entretenue par l'arrivée, à l'arrière du vaste tourbillon cyclonique, de l'air océanique froid et humide : les différences thermo-dynamiques entre les masses d'air affrontées engendrent une série de perturbations méridiennes de sud-ouest, de sud ou de sud-est, et des mécanismes orageux. Les ascendances frontales successives sont accompagnées d'averses abondantes et violentes, échelonnées dans le temps au rythme du passage des fronts. A l'ascendance

cyclonique s'ajoute l'ascendance forcée au franchissement de la barrière cévenole et vivaraise, d'où les abats d'eau considérables sur toutes les stations « au vent » des crêtes perpendiculaires au courant perturbé. « Sous le vent » l'effet de foehn est sensible là où le relief s'abaisse rapidement, dans la vallée de l'Allier au delà de Langogne et dans le « bassin » du Puy. Toutes les crues cévenoles ont cette origine. L'analyse détaillée de celles de novembre 1968 (figure 49) sur l'Allier, de septembre 1932 (figure 50), de septembre 1933 (figure 51) et mars 1930 (figure 52) en donne la confirmation. Les autres exemples abondent. L'averse de décembre 1957 (figure 53) où les précipitations, en vingt-quatre heures, le 24 du mois, atteignirent 233 mm à Lapalisse, provoqua d'énormes dommages à la lisière méridionale du bassin de la Loire où la neige tomba ce jour-là en extrême abondance ([47]). Elle donna naissance à une crue aussi typique, bien qu'en partie amortie par la rétention nivale :

250 m^3/s de débit moyen journalier maximum à Bas-en-Basset,

35 m^3/s de débit moyen journalier maximum sur la Borne,

56,3 m^3/s de débit moyen journalier maximum sur le Lignon à Versilhac,

394 m^3/s de débit moyen journalier maximum à Villerest,

mais

310 m^3/s seulement à Nevers !

Du 19 au 25 octobre 1960, sous l'assaut d'une succession de perturbations de type cévenol, alors que persistait une zone de blocage sur l'Europe Centrale (hautes pressions), le pluviomètre de Sagnes-et-Goudoulet reçut au total 724 mm de pluie. Les débits moyens journaliers maxima atteignirent

à Bas-en-Basset	430 m^3/s	le 22 octobre,
et	390 m^3/s	le 26 octobre,
et, à Vieille-Brioude	240 m^3/s	la veille de Noël.

Ici, le véritable problème posé par ces crues cévenoles est double.

— Pourquoi, d'une part, le noyau de plus forte concentration de la pluie ne se manifeste-t-il pas toujours au même lieu et touche-t-il tantôt le haut bassin de la Loire, tantôt celui de l'Allier, tantôt les deux à la fois, tantôt seulement celui de l'Ardèche ou celui du Gard ?

— Pourquoi, d'autre part, les volumes d'eau précipités peuvent-ils être si inégaux lors de situations météorologiques appartenant incontestablement au même type général ? Ils donnent le plus souvent et en toutes saisons (sauf l'été) ([48]) des averses ordinaires et donc des intu-

([47]) R. JALU (1958).

([48]) encore que les crues d'août 1910 et des 22/24 juillet 1914 incitent à atténuer cette réserve.

mescences moyennes mais aussi, parfois, de véritables déluges. Les conditions du relief étant fixes, les causes de ces différences ne peuvent être que météorologiques.

b) Pour répondre à ces deux questions il est nécessaire de rechercher dans les averses de ce type qui se sont révélées « extraordinaires » les conditions indispensables au renforcement des précipitations relevant de cette situation météorologique, que ces averses aient été ou non à l'origine de crues sur le haut bassin de la Loire.

Les averses de septembre-octobre 1958

De l'avis des spécialistes, les pluies désastreuses du 30 septembre puis du 4 octobre 1958 furent de celles qui se produisent trois ou quatre fois par siècle seulement dans la région méditerranéenne ([49]). La concentration pluviale en quelques heures (140 mm en deux heures, le 30 septembre à Alès — 100 mm de 10 heures à 11 heures puis 45 mm de 11 heures à 12 heures, le 4 octobre à Canaules), plus que la lame totale précipitée en vingt-quatre heures ([50]), eut des conséquences hydrologiques dramatiques puisque, sur plusieurs rivières cévenoles, en ces jours-là, furent égalées ou même nettement dépassées toutes les crues spectaculaires survenues depuis au moins un siècle (18-23 septembre 1890, 28-29 septembre 1900, octobre 1907). MM. FONTAINE et PORTELA ont soigneusement comparé les mécanismes météorologiques qui ont joué à quatre jours d'intervalle : les deux épisodes sont exactement du même type comme en témoignent les cartes synoptiques des figures 55 et 56 extraites de leur étude. Dans les deux cas, tous les facteurs d'une situation « classique » se trouvent réunis au sol comme en altitude : centre d'action dépressionnaire sur l'Irlande prolongé en thalweg vers la Méditerranée, perturbation alimentée en air tropical maritime puis méditerranéen, rejetée vers le sud-est par le courant polaire maritime froid, enfin zone de blocage constituée par les hautes pressions d'Europe Centrale. Cependant, l'équilibre réalisé entre ces facteurs dont quelques traits sont relevés ci-dessous est assez différent lors des deux épisodes pour que la pluie soit nettement moins abondante le 4 octobre que le 30 septembre et que le noyau d'intensité maximale soit décalé entre les deux averses des parties supérieures aux parties moyennes des bassins hydrologiques.

([49]) P. FONTAINE et C. PORTELA (1959) et M. PARDE (1963, pp. 472-477).

([50]) D'après M. A. SCHENCK, secrétaire général de la Société Météorologique et Climatique du Gard et des Cévennes, les plus fortes hauteurs en vingt-quatre heures ont été relevées, au cours de la première averse, à Saint-Maurice de Ventalon : 424 mm — Saint Etienne Vallée Française : 429 mm — Valleraugue : 410 mm — au nord-ouest de Saint Jean du Gard : 400 mm. Or les records précédents auraient été : 792 mm à Joyeuse en vingt-quatre heures d'octobre 1827 et 950 mm à Valleraugue le 29 septembre 1900. La seconde averse du 4 octobre fut partout moins copieuse, la lame d'eau précipitée n'ayant dépassé nulle part 200 mm.

30 septembre	4 octobre
masse d'air continental	
plus étendue, elle couvre l'Italie, la Sardaigne, la Corse et s'avance vers les Préalpes	s'étend à l'Italie du nord seulement 3.500 mètres d'épaisseur
courant de sud-est	
plus rapide : 80 nœuds au Mont-Ventoux	50 nœuds au Mont-Ventoux
air polaire maritime	
épaisseur : 3.000 mètres température : $\theta'w$ ([51]) = 17°	4.000 mètres $\theta'w$ = 15°

Le 4 octobre, l'évolution du système perturbé (occlusion et expulsion polaire maritime postérieure) a été plus rapide que le 30 septembre parce que, d'une part, l'air polaire maritime était plus actif et que, d'autre part, l'efficacité du blocage à l'est était moindre (air méditerranéen plus lent et recul de l'anticyclone continental). Il en est résulté un déplacement vers l'est du théâtre des averses entre le 30 septembre et le 4 octobre et, si les précipitations demeurèrent aussi intenses, elles furent moins durables.

L'évènement météorologique aberrant d'octobre 1960

Les pluies exceptionnelles des 3 et 4 octobre 1960 ont retenu l'attention des hydrologues et des météorologues à cause de leur origine et de leur rare abondance sur les hauts plateaux limousins ([52]). Elles relèvent exacte-

([51]) $\theta'w$ ou température pseudo-adiabatique potentielle du thermomètre mouillé est obtenu facilement sur un émagramme en ramenant à la pression de 1.000 mb la température du thermomètre mouillé θw c'est-à-dire de l'air saturé dans la masse d'air en question. C'est un critère commode pour comparer les températures des différentes masses d'air en altitude.

([52]) — P. FONTAINE (1962) ;

— M. PARDE (1962) ;

— plusieurs articles signés de J. JACQUET, M. PARDE, P. FONTAINE, P. GUILLOT, J. L. LACROIX, M. PELLECUER et F. BARRIERE, G. D'HARCOURT, R. HLAVEK et C. LECARPENTIER dans le numéro II - 1961 de Mémoires et Travaux de la Société Hydrotechnique de France. Du point de vue pluviométrique, les intensités maximales n'ont rien eu d'exceptionnel : 30 mm/h pendant moins d'une heure à Millevaches le 3 octobre en fin d'après-midi. Leur caractère remarquable tient à la durée (15 heures) pendant laquelle une intensité moyenne de 100 mm/h a été observée sur plusieurs centaines de km^2. Les débits spécifiques maximaux (1200 l/s/km^2 à Tulle pour 370 km^2 — 1300 l/s/km^2 pour le bassin de la Vimbelle de 140 km^2) modestes, comparés à ceux des rivières cévenoles, ont tout de même constitué des records pour toutes les stations considérées : ils ont surpassé de loin les plus forts débits de crues connues.

ment du même type de situation météorologique que les averses dont le sud-est des Cévennes et la plaine du Bas-Rhône sont habituellement le théâtre et presqu'en tous points, même pour la date, elles ont été la réitération de l'évènement cévenol du 4 octobre 1958 (figure 57). Seulement, contre toute prévision, elles se sont produites à 200 kilomètres au delà des Cévennes et de la Montagne Noire avec une intensité maximale sur les cours supérieurs de la Vézère et de la Corrèze. Elles furent d'ailleurs suivies, quelques heures plus tard, de pluies dites « cévenoles » non négligeables dont la répartition est inscrite sur la carte d'isohyètes de la figure 58 et qui ont fait monter le débit moyen journalier en trois jours de 15 m^3/s à 160 m^3/s à Bas-en-Basset, et de 6 m^3/s à 80 m^3/s à Lavalette sur l'Allier.

La localisation inattendue de l'averse des 3-4 octobre 1960 perd toute étrangeté quand le mécanisme météorologique en est comparé à celui de 1958. D'une part, le puissant dôme continental d'air froid (5.000 mètres d'épaisseur au lieu de 3.500 mètres le 4 octobre 1958) qui s'avançait jusqu'à la vallée du Rhône et se prolongeait au sol par de l'air frais recouvrant le nord et le centre de la France s'opposa vigoureusement au flux d'air tropical océanique constituant le secteur chaud de la perturbation. Celui-ci, d'autre part, fut beaucoup plus actif et son avance vers l'ouest plus prononcée qu'en 1958 en raison notamment de l'affaiblissement, le 3 octobre, de l'air froid postérieur qui ne parvint pas à couper l'alimentation du secteur chaud et à provoquer le phénomène habituel d'occlusion. Le conflit ainsi prolongé entre l'air froid continental et l'air chaud tropical maritime de sud-ouest explique à la fois la localisation, l'intensité et la durée des précipitations. Secondairement, l'ascendance orographique, bien que modérée, n'a pu que renforcer les pluies frontales ([53]).

Les pluies du 30 septembre 1965 en Bourgogne

C'est une situation semblable aux précédentes qui s'est présentée en 1965 ([54]) (figure 59). Les pluies, d'une violence exceptionnelle dans cette région, provoquèrent de fortes crues et de graves inondations dans

([53]) L'averse des 1-2-3 mars 1930 est un autre cas de pénétration méditerranéenne sur l'ouest du Massif Central. Elle a causé une crue énorme sur l'Orb, l'Aude inférieure et bien plus encore sur le Tarn et ses affluents, notamment sur l'Agout qui eut un maximum peut-être millénaire ; et par suite sur la Garonne moyenne et inférieure, qui égala ou battit ses records au delà du confluent avec le Lot (cf. M. PARDE, 1930). Cependant, la situation météorologique de mars 1930 s'apparente davantage à celle de septembre 1933 qu'à celle de 1960 (cf. figures 51 et 52). Il s'agit toujours d'une circulation méridienne avec remontée progressive de l'air chaud méditerranéen vers le nord-ouest mais l'origine des centres d'action est différente.

([54]) H. CONTAT, G. LENOIR et M. STRIFLING (1965), P. FONTAINE (1968), D.A.T.A.R. (1967).

les bassins de la Bourbince, de l'Arconce, de l'Arroux, affluents de la Loire, et dans ceux de la Vingeanne, de la Tille, de l'Ouche, de la Dheune et de la Grosne, affluents de la Saône. Le 2 octobre, le réseau de l'Arroux (3.300 km²) apporta à la Loire presqu'autant d'eau que le fleuve lui-même à l'issue de 9.330 km² du bassin versant (figure 60). Une telle situation est sans doute rare, le blocage des fronts froids ayant lieu généralement à une latitude bien plus méridionale. Elle est néanmoins possible.

Cependant, s'il est, à la rigueur, admissible de parler encore, en ce cas, de « pluie méditerranéenne extensive », est-il permis de qualifier de même la crue du 2 octobre sur les affluents morvandiaux de la Loire, qui viennent renforcer considérablement le flot déjà en crue de la Loire supérieure. Cette crue, dans les typologies strictement hydrométrique et descriptive, a sa place parmi les crues de la catégorie VI de P. GUILLON (« augmentant d'importance en descendant vers l'aval pour la Loire supérieure seule ») ou parmi les crues « mixtes ». Elle introduit naturellement à l'analyse malaisée des crues polygéniques.

2. *Le problème du gonflement des crues d'amont en aval*

Hormis les crues qui naissent à la lisière méridionale du bassin et décroissent rapidement en aval comme celle, très forte, de novembre 1968 sur l'Allier (figure 49), trois grands styles d'évolution selon la localisation des apports peuvent être distingués. Le renforcement peut porter sur

— certaines crues déjà fortes sur les cours supérieurs de la Loire et de l'Allier,

— des crues faibles ou moyennes dans le haut bassin et qui, en conséquence, n'arriveraient pas à Gien sans les apports pluviaux d'une zone traversant en écharpe le Massif Central du Cantal au Morvan,

— des crues faibles ou déjà fortes en amont qui grossissent régulièrement en se propageant vers l'aval même au delà de Gien. Toutes les crues de la dernière catégorie de GUILLON présentent ce caractère.

a) Les trois exemples précédents de 1958, 1960 et 1965 ont montré que l'ascendance cyclonique de l'air chaud au passage de fronts chauds ou froids est la cause principale de la violence et de l'abondance des averses. Les fortes pentes cévenoles accélèrent l'ascendance et les phénomènes de condensation qui l'accompagnent mais ceux-ci acquièrent encore plus d'ampleur et d'intensité par la présence en altitude d'air froid qui détermine un gradient thermique élevé et donc une forte instabilité verticale. L'ascendance orographique a un rôle secondaire, accessoire, limité, dans la production des précipitations violentes et orageuses qui peuvent prendre naissance avant l'action du relief (1958) ou même après (1960) si l'ascendance cyclonique frontale se poursuit en surface ou en altitude.

Il n'y a dès lors aucun doute sur la commune nature cyclonique des pluies qui sont à l'origine du renforcement, bien au delà de la zone faîtière, des crues cévenoles déjà très fortes sur le haut bassin comme, par exemple, celles de septembre 1866, de septembre 1875, la 2ème d'octobre 1907, d'octobre 1943 sur l'Allier, ou d'octobre 1846, d'octobre 1872, la première d'octobre 1907 sur la Loire. Les témoignages des observateurs sont à ce sujet décisifs.

— *octobre 1846.* C'est dans la région de Montbrison-en-Forez, le 15 au soir, qu'ont commencé les orages qui ont cessé seulement le 18, vers 6 heures du matin. La quantité d'eau tombée à Montbrison pendant ce laps de temps fut de 153 mm. Le 16 octobre, vingt-quatre heures

Octobre 1846 à Pont-de-Mars	*Vents*	*Etat du ciel*	*P en mm*
9	N.	clair	0
10	S.	clair	0
11	N.O.	1/2 clair	0
12	N.O.	1/2 clair	9
13	N.O.	pluvieux	9
14	S.	1/2 clair	0
15	S. fort	pluie	13
16	S. fort	pluie	67
17	S. fort	pluie	48
18	S.	pluie / orages	42
19	S.	pluie	61
20	N.O.	pluie	2
21	O.	pluies par giboulées	1
22	O.	1/2 clair	2
23	N.O.	1/2 clair	0

après les premiers orages à Montbrison « on observait sur la ligne de partage des eaux du Rhône et de la Loire un bourrelet nuageux du genre de ceux que les vents méridionaux amènent sur ces hauteurs ; ils sont les précurseurs et le véhicule des pluies dont le résultat habituel est de produire des crues modérées qui font peu de mal au littoral de la Loire mais, cette fois, dès la soirée du 16, il y eut une succession de détonations terribles, des éclairs sillonnaient presque constamment des nuées épaisses et celles-ci ne tardaient pas à changer les moindres ruisseaux en torrents dévastateurs. Le 17 octobre, à deux heures du matin, le météore se déplaçant abandonna le bassin compris entre la chaîne orientale du Velay et le massif volcanique qui domine la petite ville de Monastier pour gagner les profondeurs de la vallée et se porter aux environs du Puy, principalement sur la rive droite de la Loire. Pendant

cet orage sinistre, éclairs, ouragan furieux, pluie diluvienne... Vers huit heures du matin, la Dolaison, la Borne, l'Olaison et la Loire étaient complètement débordés. Dans la soirée, les ponts furent emportés et la masse des eaux continua à s'accroître jusqu'au milieu de la nuit. Le 18, à deux heures du matin, l'orage cessa complètement ». A Pont-de-Mars, sur le Lignon, M. de Chalendar, qui habite cette localité où l'inondation a fait beaucoup de ravages, fournit quelques données qui indiquent bien les sautes de vents caractéristiques du passage d'une perturbation ([55]).

Le corps orageux paraît avoir envahi simultanément tout le bassin oriental de la Loire, du Morvan au Velay, et le haut bassin de l'Allier.

L'Aron monta à 4 m 40 le 17 octobre à Roche (plus forte cote connue), la Besbre monta à 4 m 30 à Dompierre (plus forte cote connue également), l'Arroux, la Bourbince, le Lignon du Forez montèrent respectivement à 4 mètres à Availly, à 3 m 60 à Paradis, à 2 m 50 à Boën. Et, pour le haut Allier, voici le rapport d'un observateur de Brioude (P. LE BLANC, 1872 à 1875) : « Dans la nuit du 17 au 18 octobre, a eu lieu l'un des plus terribles débordements qu'ait éprouvés cette rivière. Il est dû à une trombe d'eau tombée dans la partie supérieure de son cours, en même temps qu'à des pluies torrentielles qui durèrent huit jours... ». Le désastre avait commencé le 16 sur la Siane et le Var. L'Hérault subit une forte crue ordinaire et, le 18, la crue du Rhône fut très forte à partir de Pont-Saint-Esprit. Elle le fut aussi sur le Pô. En revanche, les crues furent insignifiantes sur la haute Garonne, le Tarn, le Lot, la Vienne, la Creuse et le Cher.

— *Septembre 1866.* « Station de Langogne : dans la nuit du 23 au 24, grands éclairs et coups de tonnerre, pluie d'orage à partir de cinq heures du matin et sans discontinuer jusqu'au 25 à cinq heures du matin. Le 24, à 4 heures 30 du soir, début d'une pluie torrentielle qui dure trois heures ; vent du nord-ouest, le ciel était en feu.

Station de Clermont-Ferrand : vent très violent du sud-ouest pendant toute la soirée du 22 et pendant la nuit suivante. Pluie continue depuis le 23 à dix heures trente du matin jusqu'au 25 vers une heure du matin » (P. LE BLANC, 1872-1875).

— Pour *septembre 1875,* le compte rendu de BELGRAND (1875) adressé à l'Académie des Sciences est le suivant : « Ces inondations se rattachent à un groupe de pluies orageuses très générales qui, du 9 au 13 septembre, ont mouillé toute la partie de la France comprise entre le bassin de la Loire, inclusivement, les Pyrénées et le littoral méditerranéen. Les pluies désastreuses sont tombées sur toute la surface de quatre départements : l'Aude, l'Hérault, la Lozère et l'Ardèche, ainsi que sur une partie des départements limitrophes : le Tarn, l'Aveyron, le Gard

([55]) cf. tableau p. 199, extrait de notes manuscrites. Fonds GUILLON, nº 1889 f. 33.

et la Haute-Loire. Elles ont atteint environ la hauteur d'un demi-mètre, ce que reçoit Paris dans une année moyenne. La pluie a conservé la même intensité dans la haute partie du bassin de l'Allier sur la chaîne des Margerides jusqu'à Issoire » (Châteauneuf-de-Randon a reçu 125 mm du 9 au 13, la Chaise-Dieu 74 mm). Fait que sa rareté signale à l'attention, cette crue, forte sur la haute Loire, moyenne à Digoin, insignifiante à Nevers, fut, sur l'Allier, des sources au confluent, l'un des plus gros débordements de cette rivière. Mais elle fut très forte aussi sur l'Hérault, la Truyère et le Tarn à Florac.

Il semble qu'une partie du bassin de la Loire, tantôt vaste, tantôt réduite et d'ailleurs variable, se trouve, un peu au hasard, dans l'orbite de vastes masses pluvieuses puissantes, mouvantes. Le réseau hydrographique le plus proche du foyer ou de l'axe de concentration pluviale est alors submergé d'eau ruisselant en abondance. Et il suffit que le noyau de la plus grande intensité pluviale se déplace de quelques dizaines de kilomètres seulement — ce qui est fort peu à l'échelle d'un phénomène météorologique qui se développe sur des dizaines de milliers de kilomètres carrés — pour que la carte des débits maxima soit entièrement transformée.

b) L'examen de crues à tous égards ordinaires en amont et renforcées dans la partie médiane seulement du Massif Central met en relief le rôle primordial que jouent encore dans ce genre d'événements hydrologiques les circulations atmosphériques méridiennes qui favorisent les affrontements de masses d'air très contrastées originaires du NW, N ou NE, d'une part, et du SW, S ou SE, d'autre part.

Si modérées qu'elles aient été à Gien en comparaison des grands épisodes qui viennent d'être rappelés, quelques crues récentes font apparaître les mécanismes qui peuvent jouer en ces circonstances.

La crue du *23 mai 1965* à Gien a très peu atteint la haute Loire et le haut Allier qui n'ont grossi qu'à partir de Bas-en-Basset et de Vieille-Brioude sous l'influence de tous les affluents de la partie médiane du bassin, Sénouire, Alagnon, Dore, Besbre, Arroux. Ceux-ci ont particulièrement contribué à cette croissance que n'ont soutenu, en aval, après Gien, ni le Cher ni l'Indre ni la Vienne (figure 61). Le type de circulation atmosphérique n'est pas sans analogie avec la situation des 3 et 4 octobre 1960 sur le haut Limousin comme le montrent les deux cartes d'isohypses et de l'isotherme de 0° comparées, à 3.000 mètres d'altitude. Les précipitations du 18 mai 1965 sont dues à un flux de sud-ouest au sol associé au passage d'une vallée froide en altitude. L'air froid descend jusqu'au Portugal provoquant à l'avant de la vallée planétaire un soulèvement de l'air plus chaud qui stagnait sur la France. En 1965, les contrastes sont beaucoup plus atténués qu'en octobre 1960 de même que les caractères de l'épisode pluvieux. Toutes proportions gardées, l'intensité pluviale au cours de l'après-midi du 18 mai 1965 est loin d'être négligeable avec

un maximum moyen de 20 mm en deux heures dans presque toutes les stations munies de pluviographes.

L'évolution de la situation météorologique sur le Massif Central *après l'événement des 3 - 4 octobre 1960* n'est pas sans intérêt malgré les très faibles effets qu'ont eus sur les débits fluviaux les épisodes pluvieux qui en ont été cause. D'abord, l'averse des 3 et 4 octobre a très légèrement effleuré l'ouest du bassin de la Loire : en amont de Vieille-Brioude, le bassin de l'Allier a reçu une lame d'eau moyenne de 27 mm ; la Couze de Pavin dont le haut bassin s'insinue entre le Sancy et le Massif du Cézallier s'est gonflée le 4 octobre ; la Sioule, beaucoup plus proche des opérations pluvieuses a vu son débit moyen journalier passer de 8,8 m^3/s le 2 octobre à 59 m^3/s le 4 ; enfin, le 3, Nevers a recueilli 53 mm de pluie, Saint-Pierre le Moutier 21 mm, Bourbon l'Archambault 23 mm. Puis, dans la nuit du 5 au 6 octobre, une seconde averse frappa le haut bassin de l'Allier et surtout ceux de la Loire et du Lignon vellave. La crue qui en résulta fut fortement amoindrie sur la Loire par les prélèvements de Montpezat mais, partout, les rivières du haut bassin réagirent rapidement :

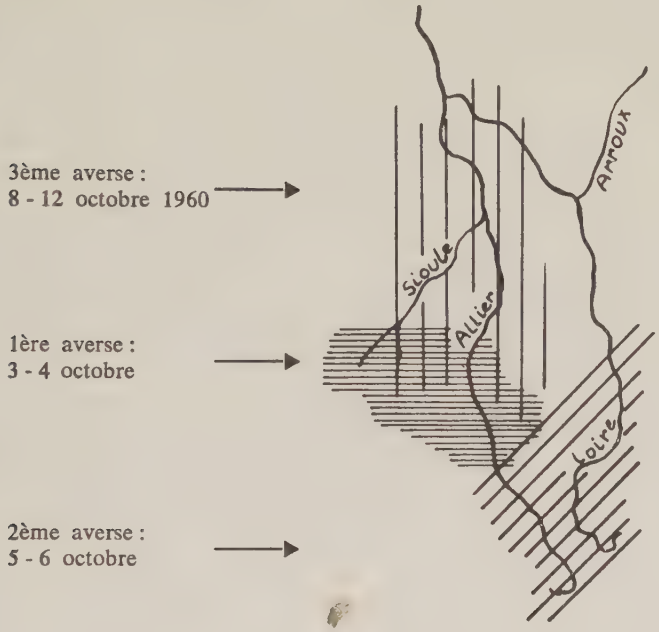
rivière	*date*	*bassin* (km^2)	*Qj max.* (m^3/s)
La Loire à Rieutord	le 5	62	27
La Borne à Chadrac	le 7	430	4,6
Le Lignon à Chambon s/Lignon	le 6	147	33
La Dunière à Vaubarlet	le 6	220	40
La Loire à Bas-en-Basset	le 6	3300	160
La Loire à Villerest	le 7	6520	230
L'Allier à Lavalette	le 6	394	80

Quelques nuages poussés par les vents sud-est vont s'égoutter sur le Forez, le Livradois, le flanc sud-oriental de l'alignement Cézallier-Mont Dore.

rivière	*date*	*Qj max.* (m^3/s)
La Dore à Giroux	le 6	23
L'Alagnon à Joursac	le 6	16,5
La Couze à Saint-Floret	le 7	4,2

Enfin, trois jours après, un nouvel épisode pluvieux du 8 au 12 octobre s'étend principalement aux départements de la Nièvre, de l'Allier, du

Puy-de-Dôme et du Cantal frappant cette fois-ci les pentes exposées au nord - nord-est. Le schéma ci-dessous retrace succinctement la chronologie de ces trois averses.



A nouveau, l'Alagnon est en crue le 10 octobre (19,5 m^3/s), la Sénouire les 9 et 10 (3,4 m^3/s), la Couze de Pavin (11,5 m^3/s), la Sioule (52 m^3/s) et la Dore dont le maximum est égal à celui du 6 octobre (23 m^3/s). Jusqu'à la fin du mois, le haut bassin de la Loire, beaucoup plus que celui de l'Allier, recevra des averses cévenoles répétées, les 19, 20, 22, 25, 28, qui aboutiront à faire monter le débit moyen journalier à 1.500 m^3/s à Gien le 2 novembre 1960.

La situation météorologique du thalweg froid a évolué en celle de goutte froide détachée de l'extrémité du thalweg et caractérisée par la présence au sol et en altitude d'un centre de basses pressions sur la Méditerranée occidentale qui dirige un mouvement tourbillonnaire cyclonique. Il en résulte une aspiration d'air méditerranéen chargé d'humidité, qui contourne la face orientale de la dépression et qui, arrêté à l'est et au nord par la présence de hautes pressions sur l'Europe, se rabat d'est en ouest et vient arroser les versants montagneux qui lui font face. Tant que la dépression se maintient, elle provoque une succession d'offensives de plus en plus limitées à la barrière cévenole.

La crue du *30 septembre 1956* à Gien, due à une situation du même type a connu le même renforcement d'aval :

Stations de l'Allier	*date*	*Qj max. (m^3/s)*	*Stations de la Loire*	*date*	*Qj max. (m^3/s)*
Vieille-Brioude	le 27	47	Bas-en-Basset	le 27	87
Vic-le-Comte	le 27	141	Villerest	le 27	212
Billy	le 28	240			
Pont-du-Guétin	le 28	300	Nevers	le 29	830
Gien, le 30 septembre 1956, 990 m^3/s					

L'épisode de *mai 1959* est encore une variante de la même situation météorologique (figure 62). Le débit moyen maximum journalier a été de 550 m^3/s seulement à Gien mais l'évolution de la crue d'amont en aval a été identique.

La crue du *28 mai 1958* à Gien est un bon exemple de crue « de saison chaude » ([56]). Née dans la région bourbonnaise, elle grossit en aval de Digoin sur la Loire grâce à l'apport des eaux du Charolais et du Morvan, et seulement à partir de Billy sur l'Allier, surtout après la confluence de la Sioule en très forte crue :

Stations de l'Allier	*date*	*Qj max. (m^3/s)*	*Stations de la Loire*	*date*	*Qj max. (m^3/s)*
Billy	le 27	99	Digoin	le 26	36
Pont-du-Bouchet	le 26	195			
Pont-du-Guétin	le 27 20 h.	510	Nevers	le 27 4 h.	410

La cause en est une averse « exceptionnelle » pour le nord-ouest du Massif Central selon l'échelle de J. PINARD (1965) ([57]). Elle atteignit son maximum d'intensité le long d'un axe allant du haut Cher au Causse de Grammat, comme au cours de l'averse des 3 et 4 octobre 1960.

([56]) cf. figure 42 B. Ces fortes crues de mai-juin sont un trait original de la Vienne, de la Creuse, de l'Indre et du Cher, rivières pour lesquelles les moyennes mensuelles de débits sont faibles durant ces mois et de beaucoup les plus grosses en hiver (M. PARDE, 1964 b).

([57]) L'auteur a adopté un classement quantitatif des averses en mesurant la superficie limitée par une isohyète caractéristique. Les 3 et 4 octobre 1960, il serait ainsi tombé au moins 120 mm sur une superficie de 5.000 km^2 et, du 23 au 25 mai 1958, au moins 120 mm sur 3.750 km^2.

L'évolution de la situation météorologique du 20 au 25 est représentée sur les cartes de la figure 63. En cinq jours, à une circulation de sud-ouest au cours de laquelle le passage de fronts sur le Massif Central entraîne seulement de très faibles averses, succède une circulation rapide franchement méridienne qui met en présence en altitude et au sol des masses d'air beaucoup plus contrastées. En altitude, de part et d'autre de l'isohypse 556, circulent, à l'ouest, du nord au sud, de l'air à $-30°$ et, à l'est, du sud au nord, de l'air à $-10°$. Au sol, le Massif Central est partagé en deux : l'ouest (confins aquitains et nord-ouest) reçoit des masses d'air frais poussées par des vents d'ouest dominants tandis que, sur le centre et l'est, soufflent des vents à composante sud favorisés d'ailleurs par l'orientation méridienne du relief auvergnat. L'affrontement se produit à l'ouest du môle que constitue le Massif Central et il se traduit par des orages violents et des précipitations abondantes. Puis le temps se rétablit lentement, non sans séquelles pluvieuses, en même temps que se comble sur la Manche et la Mer du Nord la zone dépressionnaire complexe qui prenait en écharpe toute l'Europe.

La grande crue de *mai 1940* relève, selon toutes apparences, de la même catégorie : moyenne sur le cours supérieur de la Loire (Villerest, le 4 mai : 352 m^3/s), plus forte sur celui de l'Allier (Vieille-Brioude, le 3 mai : 341 m^3/s), considérablement grossie par les rivières du bassin moyen (Sioule notamment : 350 m^3/s à Pont-du-Bouchet, le 4 mai, et Cher), son débit moyen journalier maximum atteint 3.026 m^3/s à Gien et 4.230 m^3/s à Montjean.

Certains épisodes de la crue « formidable » (M. PARDE, 1958) de *mai-juin 1856,* peut-être la plus haute, la plus longue et la plus désastreuse qui se soit produite sur la Loire à partir de Roanne et sur l'Allier à partir de Vichy, semblent bien avoir eu la même origine. La première intumescence (5 m 67 à Montjean, le 17 mai) a été surtout très forte sur le Cher (4 m 30 à Noyers, le 13 mai), l'Indre, la Creuse, l'Yonne et les affluents du Morvan (à Paris, 5 m 70, le 12 mai) en même temps que sur la Saône à Châlons, la Dordogne et la Garonne à Toulouse. La deuxième montée de 5 m 31 à Montjean, le 23 mai, est due surtout à la participation de la Loire supérieure et de l'Allier, alors que les affluents de l'ouest du Massif Central n'ont pas eu de crue. Cependant les maxima dans le haut bassin ont été atteints seulement à la suite des pluies qui, du 27 au 31 mai ont porté les eaux à des cotes historiques : l'Allier : 5 m 42 à Moulins le 31, la Loire : 6 m 13 à Nevers le 1er juin, 7 m 19 à Gien le 2, 6 m 26 à Montjean le 5 ; le Cher, l'Indre, la Creuse et la Sioule atteignirent des niveaux parmi les plus hauts connus. En même temps, les crues furent très fortes sur la Dordogne, le Lot, le Tarn, la Garonne et ses affluents pyrénéens. La Seine et la Saône furent également touchées mais moins qu'au mois de mai. Toutefois, ces dernières pluies n'eurent aucun effet sur la Mayenne et n'occasionnèrent qu'une

crue insignifiante sur la Sarthe. C'est seulement les 3 et 5 juin que ces deux dernières rivières entrèrent réellement en crue sous l'influence des pluies tombées du 3 au 6 juin (56 mm dans la région nantaise). Le dernier soubresaut de la Loire à Montjean avec 6 m 14 à l'échelle le 8 juin n'a pourtant pas été seulement la conséquence de ces dernières précipitations mais de la rupture « à l'envers » des digues qui protégeaient la longue vallée de l'Authion où s'était accumulée une énorme masse d'eau dont l'écoulement provoqua un second maximum, factice, de la Loire à partir du confluent avec la Maine.

c) Cependant, avec des crues comme celle de juin 1856, étendues à toutes les artères du bassin de la Loire et augmentant progressivement le long du fleuve jusqu'à son embouchure dans l'Atlantique, apparaissent les caractères suivants : poussées le plus souvent multiples au-dessus d'un débit initial déjà nourri, montées et décrues moins subites, volumes bruts élevés, participation relativement modeste du haut bassin. Ce type de crue polygénique a, toutefois, son maximum de fréquence de décembre à mars.

La double crue de *février 1957* présente tous ces traits (figure 64) et montre, de surcroît, le rôle que peut jouer la fusion nivale en saison froide sur le gonflement des débits. Le 18 février, une première pointe se dessine sur l'hydrogramme de Gien (1.250 m^3/s) et, dix jours après, le 28 (1.950 m^3/s), les eaux montent à 4 m 48 plaçant la crue au trentième des plus fortes qui se sont produites en cette station depuis 1825 (tableau n° 64). Pendant toute la période, le Massif Central reste sous l'influence d'un courant perturbé d'ouest qui fait affluer des masses d'air océanique humides et relativement douces (figure 65). Le premier épisode pluvieux, le plus fort sur le haut et moyen bassin de la Loire et de l'Allier, donne une crue très ordinaire :

à Bas-en-Basset,	62	m^3/s	de débit moyen maximum	le 16,
à Villerest,	163	m^3/s	de débit moyen maximum	le 16,
à Nevers,	760	m^3/s	de débit moyen maximum	le 17,
à Vieille-Brioude,	90	m^3/s	de débit moyen maximum	le 15,
à Billy,	390	m^3/s	de débit moyen maximum	le 16,
à Pont-du-Guétin,	480	m^3/s	de débit moyen maximum	le 17,
à Pont-du-Bouchet,	120	m^3/s	de débit moyen maximum	le 14.

Au contraire, le second épisode, pratiquement nul sur le haut bassin, faible sur la partie médiane mais accompagné d'un net adoucissement de la température au sud du Massif Central, provoque une crue beaucoup plus forte :

à Bas-en-Basset,	210	m^3/s	de débit moyen maximum	le 24,
à Villerest,	451	m^3/s	de débit moyen maximum	le 25,
à Vieille-Brioude,	150	m^3/s	de débit moyen maximum	le 24,
à Billy,	580	m^3/s	de débit moyen maximum	le 25,
à Pont-du-Bouchet,	240	m^3/s	de débit moyen maximum	le 24.

Et c'est alors que le gros apport des affluents morvandiaux se déverse dans une Loire déjà enflée par les eaux de fusion : le débit moyen maximum à Nevers se maintient pendant deux jours, les 26 et 27 février, à 1.550 m³/s. Au Pont-du-Guétin, sur l'Allier, il est de 660 m³/s seulement le 26 février.

Cette situation météorologique n'est pas rare : elle se produit en toutes saisons mais les crues sont d'autant plus fortes que la trajectoire des perturbations est plus méridionale, occurence plus probable en hiver. Quand les cyclones circulent plus au nord, le sud du Massif Central se trouve en quelque sorte dans une position d'abri aérologique, plus près des hautes pressions qui s'étendent de l'Espagne à l'Europe Centrale, et visité par des fronts trop éloignés du courant perturbé pour être vraiment actifs. Ainsi, la *crue de décembre 1966 - janvier 1967* (figure 64) est insignifiante sur le haut bassin, elle grossit régulièrement jusqu'à Gien (1.060 m³/s, le 5 janvier) mais le maximum à Montjean de 2.740 m³/s se produit le 6 janvier sous l'influence des affluents de l'ouest du Massif Central dont les bassins ont été plus exposés au flux d'ouest, avant que n'arrive le flot du bassin supérieur. Les conditions isobariques au sol et en altitude étaient exactement les mêmes qu'en février 1957 mais elles se trouvaient situées à 10° de latitude plus au nord.

Une situation intermédiaire, toujours dans les mêmes conditions aérologiques, est donnée par les crues du mois de *décembre 1965* (figure 64).

Les crues de *janvier et février 1955*, aussi, ont été générales sur tout le bassin. A Gien, elles se mesuraient par les valeurs suivantes :

dates (1955)	*débit moyen journalier maximum (en m³/s)*	*hauteur*
10 et 11 janvier	1250	2 m 82
18 et 19 janvier	1700	
21 et 22 janvier	1800	4 m 04
9 février	1750	3 m 98
13 février	1850	4 m 18

En aval, à Montjean, le flot imposant du fleuve a atteint 6 m 17 en janvier et 6 mètres en février. Mais, en contraste avec les circonstances qui avaient accompagné les crues précédentes, le haut bassin n'a pas échappé aux averses. Soumise à un flux maritime de sud-ouest qui n'est pas sans rappeler le régime de thalweg de septembre-octobre 1958 ou d'octobre 1960, la France du sud, de l'est et du centre a subi, pendant plus d'un mois, les offensives répétées de perturbations évoluant entre la

zone dépressionnaire atlantique et la face ouest des hautes pressions s'étendant de la Cyrénaïque aux Balkans. Les fronts occlus des perturbations, générateurs de précipitations, ondulent du sud au nord et même du sud-est au nord-ouest selon les avancées alternantes tantôt de l'air froid continental tantôt de l'air maritime affluant par l'Afrique du Nord et la Méditerranée occidentale.

Ces crues de 1955, tout en ayant des résultats à peu près identiques, sur la Loire moyenne et inférieure, à ceux des crues d'hiver précédemment étudiées n'en sont donc pas moins très différentes par la genèse des épisodes pluvieux qui leur ont donné naissance.

C'est encore une situation météorologique très différente des précédentes qui est à l'origine de la dernière crue imposante qu'a connue la Loire, en *décembre 1968* (figure 66). Les pluies ont frappé toutes les parties du bassin presqu'en même temps : il en résulte une croissance très rapide du débit et la forme inhabituellement pointue de l'hydrogramme pour une crue d'hiver. Le débit moyen journalier à Gien est :

le 25 décembre 1968, 470 m^3/s,
le 30 décembre 1968, 2.660 m^3/s,
le 2 janvier 1969, 970 m^3/s.

La zone pluvieuse ayant à peu près exactement correspondu au Massif Central, d'Orléans au Puy, les bassins les plus arrosés ont été ceux de la partie médiane du Massif, bien exposés aux vents dominants de nord-ouest et d'ouest. Le Furens, la Coise, le haut Lignon du Forez, la Sioule, la Besbre, l'Arroux ont fortement monté sans que le débit maximum instantané ait atteint cependant des valeurs fortes (moins de 200 $l/s/km^2$ pour les bassins de moins de 200 km^2) (tableau n° 67).

Les crues d'hiver en amont de Gien peuvent sans doute résulter de situations très variées dont les cas présentés ne sont que quelques exemples. Ceux-ci permettent néanmoins de vérifier qu'en dépit des circonstances qui peuvent jouer en leur faveur (débits initiaux généralement élevés, renforcements par poussées successives, fusion nivale, faible évapotranspiration), les crues de saison froide sont relativement moins puissantes à Gien que celles de saison chaude parce qu'elles résultent de pluies, généralement apportées par des flux d'ouest desquels le bassin supérieur de la Loire en plusieurs de ses parties est bien abrité topographiquement et aérologiquement. Il se trouve de surcroît que, dans la plupart des courants d'ouest, les masses d'air affrontées sont peu contrastées parce que les échanges méridiens sont de faible amplitude : en conséquence, les phénomènes d'ascendance et de condensation produisent des pluies régulières prolongées qui gonflent progressivement les débits mais qui sont incapables de faire naître, avant Gien, les puissantes intumescences nées d'épisodes pluvieux subits et intenses.

Il reste à savoir pourquoi ces grandes crues, sur le bassin de la Loire supérieure et moyenne, sont plus fréquentes au début et à la fin de la

saison chaude (58) et les intumescences moyennes au contraire plus rares, comme les moyennes mensuelles de débit plus chétives.

3. *Le problème de la fréquence des grandes crues de printemps et d'automne*

Ce problème est facile à poser et difficile à résoudre car, par certains aspects, il outrepasse de beaucoup les limites du présent sujet.

Les situations météorologiques susceptibles de donner naissance à de fortes crues en amont de Gien sont celles qui favorisent au-dessus du bassin les ascendances brutales d'air chaud et humide, génératrices de violents orages. Ces ascendances sont provoquées par l'obstacle que constituent de hautes pressions ou des dômes d'air froid au sol exerçant un effet de blocage sur les perturbations qui circulent normalement d'ouest en est. Plus l'effet de blocage est prononcé, plus les pluies sont abondantes (30 septembre 1958).

Les ascendances sont renforcées par les effets mécaniques du relief là où les masses d'air sont contraintes de franchir des obstacles topographiques (pluies « cévenoles »). Les mouvements d'ascendance sont encore accélérés quand le champ d'ascendance de l'air chaud se trouve sous une forte aspiration cyclonique en altitude. Cependant, les transgressions froides en altitude développent une forte instabilité verticale non seulement par effet mécanique mais aussi parce qu'elles superposent de l'air froid à de l'air chaud. Plus la température des masses d'air au sol est élevée par rapport à la température de l'air en altitude en été et en fin de journée, plus l'ascendance et la condensation de la vapeur d'eau qui en résulte sont brutales.

Ces conditions sont le plus souvent réalisées quand des circulations méridiennes ou sub-méridiennes freinent, bloquent ou même renversent, comme dans le cas d'occlusion rétrograde de septembre 1933 (figure 51) et d'octobre 1965 (figure 60), le mouvement général des masses d'air d'ouest en est.

Encore faut-il, pour qu'il y ait grande abondance de précipitations que les masses d'air affrontées soient suffisamment humides et thermiquement contrastées (59). L'humidité est apportée par les flux océaniques

(58) Elles ne sont pas rares au cœur de l'été, témoins les ondes puissantes nées d'orages foréziens ou bourbonnais qui ont noyé pour quelques heures les grèves du lit mineur dans la région de Nevers en août 1804 (5 m 50 à Fourchambault, 5 m 25 à Châtillon-sur-Loire), en juillet et en août 1852 (respectivement 3 m 4 et 2 m 6 à Four chambault), le 30 août 1900 (3 m 25 à Nevers), en août 1960 (cf. ci-dessus, page 185), le 14 juillet 1882 (3 m 95 à l'échelle principale de Nevers).

(59) Le fort gradient thermique vertical peut être le même dans différentes masses d'air sans que les degrés d'instabilité verticale soient identiques si l'humidité diffère. Ainsi, MIRONOVITCH et VIAUT (1935) comparant deux sondages de même fort gradient, 0°9 par 100 m, l'un à Trappes le 22 septembre 1932 et l'autre, le sondage international n° 27 de BJERKNES du 28 décembre 1928, estiment que les

d'ouest mais surtout de sud-ouest car c'est lorsque les perturbations abordent le Massif Central par le Golfe de Gascogne que l'air polaire s'est le plus réchauffé et chargé de vapeur d'eau au cours de son long voyage sur l'Océan. La forte humidité est aussi un caractère habituel des masses d'air qui ont traversé la Méditerranée ou qui ont longtemps séjourné au-dessus d'elle. L'air froid vient généralement de l'est, du nord-est, du nord ou de l'ouest (suivant les saisons). Mais l'air polaire maritime de sud-ouest est toujours plus frais que l'air méditerranéen qu'il affronte et sous lequel il se glisse.

Dans toutes les situations météorologiques qui ont été présentées ici, les pluies les plus abondantes, du Velay au Morvan, sont nées de l'affrontement entre masses d'air océaniques venant du sud-ouest et masses d'air méditerranéennes venant du sud ou du sud-est, luttes au cours desquelles la domination des unes sur les autres n'a rien de régulier.

L'étude synoptique des types de temps pendant trente ans sur le Bassin Parisien de P. PEDELABORDE (1957) et les travaux beaucoup plus limités ([60]) mais concordants de J. PINARD (1965), J.M. CAROFF (1963-1964-1965-1966) et P. PAUL (1969) pour différentes régions du Massif Central ont bien montré que les régimes rapides d'ouest sont particulièrement fréquents en hiver, qu'ils sont accompagnés généralement de hautes pressions sur la Méditerranée et que les pluies qu'ils engendrent sur le sud du Massif Central n'ont jamais ni l'intensité ni l'abondance de celles produites dans les mêmes circonstances au nord de la Loire et à l'ouest du Massif Central. En revanche, il est fréquent, en été, en automne et surtout au printemps, que la circulation se ralentisse : les courants contrastés de nord et de sud interfèrent alors et les phénomènes orageux qui s'ensuivent sont à l'origine de pluies cycloniques abondantes. En hiver et au printemps, les invasions arctiques sont vigoureuses. Quand elles atteignent le domaine subtropical, elles y creusent des dépressions des Açores à la Méditerranée et provoquent des courants méridiens dirigés du sud au nord. Ceux-ci sont freinés dans leur progression tant que l'air froid continental recouvre l'Europe. Ils atteignent au contraire leur maximum de puissance et d'extension à partir du mois de mai quand l'air tropical les alimente grâce à la remontée vers le nord de l'anticyclone subtropical et quand le continent plus chaud que l'Océan ne les gêne plus en surface.

En été, les incursions froides n'atteignent plus qu'exceptionnellement

phénomènes d'instabilité n'ont pas pris le 28 décembre un grand développement probablement à cause de l'absence de provision suffisante de vapeur d'eau en plein hiver. En effet, la température de la haute troposphère a été, le 22 septembre 1932, de 10° plus élevée en moyenne que celle trouvée par BJERKNES le 28 décembre 1928.

([60]) parce que les champs d'étude sont beaucoup plus restreints, d'une part, et que, d'autre part, la période d'observation est limitée à des séries de dix ans seulement, les décades étant différentes chez les différents auteurs.

la Méditerranée et le sud-est du Massif Central qui connaît en cette saison un calme relatif : 51 % des types de temps y sont anticycloniques au lieu de 36 % en hiver, 38 % au printemps et 44 % en automne (d'après P. PAUL, 1969). Le flux d'air de sud à sud-est qui remonte sur la face occidentale de l'anticyclone continental est alors beaucoup trop puissant pour laisser leur efficacité aux gouttes froides et repousse les affrontements jusqu'au nord-ouest du Massif Central. Or c'est aux mois de mai-juin que les contrastes thermiques peuvent être les plus prononcés entre les masses d'air océanique, humide et relativement frais arrivant du sud-ouest, et les masses méditerranéennes avançant au-dessus d'un continent déjà chaud. L'océan, en effet, à l'est du 35ème degré de méridien ouest, est encore, en mai, presqu'à la même température qu'en mars, son mois le plus froid, alors que, de mai à juillet, son réchauffement est extrêmement rapide. Ainsi apparaissent les conditions des pluies abondantes et orageuses de l'été et, par voie de conséquence, les crues dans le bassin de la Loire moyenne. Le centre ouest du Massif Central, moins exposé cependant que l'Aquitaine à ce type d'affrontements, peut être le théâtre de tels phénomènes, origines probables de nombreuses crues d'été sur les rivières du Limousin, du Berry, du Bourbonnais et même du Morvan.

Il reste que, si les échanges correspondant aux circulations méridiennes sont vigoureux, ils sont aussi intermittents et localisés. Dans ces conditions, il n'est pas étonnant qu'un épisode pluvieux, même exorbitant, sur une partie du bassin (comme en 1878 sur la haute Loire, par exemple) ne réussisse jamais, seul, à faire naître de grosses crues à Gien. Ces dernières sont toujours le résultat de croissances assurées d'amont en aval par la succession d'épisodes pluvieux sur diverses parties du bassin ; les évolutions d'octobre 1960 ou de septembre-octobre 1965 en ont donné la preuve. Dès lors, plus que la fréquence de certaines situations météorologiques typiques, ce qu'il conviendrait d'élucider c'est l'enchaînement entre les situations pouvant produire en un court laps de temps des averses abondantes en différents lieux du bassin. Il semble possible, par exemple, qu'en mai-juin 1856, qui reste l'événement hydrologique ligérien le plus remarquable et le plus complexe, les premières averses de mai aient été dues à une situation comparable à celle de mai 1958 : circulation d'ouest passant à sud-ouest, correspondant à la formation d'un thalweg froid en altitude (figure 67). Puis le déplacement de la zone pluvieuse (second épisode) dans le domaine habituel des affrontements cévenols fait penser à une avancée de la pointe du thalweg froid jusqu'à la Méditerranée. Enfin, une dernière étape, sorte de grand retour d'est d'air méditerranéen, pourrait caractériser l'effet d'une goutte froide active sur le centre, comparable à celle d'octobre 1965.

*
* *

Toute l'analyse des circonstances météorologiques dans lesquelles des crues typiques se sont produites a été orientée par trois grands problèmes que posent les crues de la Loire :

— celui de leur variété,

— celui de la puissance de certaines d'entre elles qui grossissent démesurément d'amont en aval,

— celui de leurs singularités saisonnières par rapport au rythme moyen d'évolution mensuelle des débits.

La dernière question a trouvé une réponse dans le maximum de fréquence au printemps et à l'automne des circulations méridiennes susceptibles de produire des abats diluviens sur le bassin de la Loire supérieure et moyenne. Cependant, si l'origine météorologique des grandes crues singulières de mai-juin est reconnue dans les très grandes lignes, il reste encore dans le détail bien des incertitudes sur la localisation précise des averses, leur abondance, leur fréquence, sans parler de leurs effets hydrologiques si variables.

A la lumière des analyses qui ont porté sur l'atténuation des débordements cévenols, leur persistance ou leur renforcement, le problème de l'évolution des grandes crues d'amont en aval paraît être lié ultimement aux mécanismes d'enchaînement des situations météorologiques. Il est certes possible — la situation de décembre 1968 en a donné un exemple (figure 66) — qu'un même front pluvieux d'une largeur maximum de cent à deux cents kilomètres se situe exactement dans l'axe du bassin supérieur de la Loire et produise partout à la fois des pluies. Il peut se produire aussi un déplacement du corps pluvieux au-dessus d'une même artère fluviale — comme probablement en septembre 1875 sur l'Allier — mais cette situation exceptionnelle ne peut jamais intéresser toutes les artères à la fois. Les grandes crues à Gien sont le résultat de renforcements très divers dus à des évolutions et des combinaisons extrêmement variées des conditions météorologiques. Une véritable « prévision » des crues implique la connaissance de ces mécanismes dont, à supposer même qu'ils puissent se répéter trait pour trait, ce qui est inconcevable, les conséquences peuvent être très différentes suivant les saisons et l'état initial du bassin.

Enfin, une exacte correspondance à chaque type de crue d'une situation météorologique donnée n'existe guère si ce n'est localement en certaines parties du bassin climatiquement homogènes et peu étendues. Mais les possibilités multiples de combinaisons des flots élémentaires ont suffisamment montré qu'un même type d'évolution météorologique peut donner des résultats très inégaux (ne serait-ce qu'en volume) et que des évolutions hydrométriquement comparables peuvent être dues à des causes pluviales très diverses (cas des « renforcements » par les rivières morvandelles en octobre 1965 et en décembre 1968, par exemple).

Dès lors, il paraît non seulement difficile mais hasardeux d'établir un

classement proprement génétique des crues de la Loire. La typologie qui retiendrait comme critère essentiel les tendances saisonnières de la circulation générale sur l'Europe occidentale pourrait peut-être distinguer opportunément les crues de saison chaude, les crues d'automne et les crues d'hiver. Mais cette typologie resterait plus descriptive que réellement explicative. Bien que la corrélation entre précipitations et écoulements soit étroite au cours des épisodes « dramatiques » de la vie du fleuve que sont les crues, quand il s'agit de relier directement les crues et les situations météorologiques qui engendrent les fortes averses, l'entreprise semble pleine de risques : la corrélation peut précisément être établie entre crues et averses, moins sûrement entre averses et situations météorologiques et très hypothétiquement entre crues et situations météorologiques. La raison essentielle en est que les phénomènes hydrologiques, d'une part, et les phénomènes météorologiques, d'autre part, se développent à des échelles très différentes. Même les 35.000 km² du bassin de la Loire supérieure allongés sur 350 kilomètres, variés à l'infini quant au relief, au sol, à la couverture végétale, font un domaine de petite taille comparé aux dimensions qu'atteignent les centres d'action atmosphérique, les masses d'air et les discontinuités frontales. Les météorologues, par exemple, ne parlent-ils pas de « dimensions limitées » à propos d'une invasion froide couvrant une surface égale à celle de la France (M. CONDET, 1949) ? Les centres d'action n'ont-ils pas fréquemment cinq à dix kilomètres d'épaisseur ? Chaque cyclone n'est-il pas un énorme tourbillon de deux mille à trois mille kilomètres de diamètre ? De plus, ces vastes ensembles sont animés de mouvements horizontaux et verticaux incessants qui modifient à chaque instant leur dynamisme interne. La température et l'humidité au sol ne sont pas non plus à négliger dans le jeu capricieux des facteurs qui les conditionnent. Mais, dans le cas des grandes averses, les facteurs aérologiques prévalent : les lieux et les intensités des affrontements cycloniques sont difficiles à prévoir avec rigueur parce qu'ils sont extrêmement variables. Il est permis de dire, avec L. GACHON (1968), que « même dans certaines situations équilibrées ou presque, l'air, les masses d'air manifestent quelque imprévisible " liberté " de mouvement ». Par comparaison avec cette énorme masse en continuel mouvement, les bassins récepteurs au sol sont fixes et semblent minuscules comme, a fortiori, les artères du réseau hydrographique, si larges soient-elles.

La disproportion cependant entre le phénomène causal constitué par l'évolution du temps et ses effets sur les débits fluviaux n'est pas, de soi, un obstacle insurmontable. Mais elle se double d'une autre disproportion relevant, elle, non plus de la nature des faits dont les concomittances sont recherchées mais de la connaissance que nous en avons : autant les crues ont été depuis longtemps décrites, scrutées, classées, autant l'étude des types de temps en leur ampleur est récente, et, pour cette raison,

fragmentaire et limitée. Car c'est depuis peu que sont mis en œuvre pour les besoins de la circulation aérienne les moyens requis pour, à chaque instant, connaître, comprendre et, à moindre degré, prévoir la naissance et l'évolution des situations météorologiques, leur nature globale et leurs complexes caractères au sol et en altitude. Pour découvrir les critères vraiment satisfaisants d'un classement génétique des crues de la Loire, il faudrait que fussent mises en parallèle des observations hydrologiques et météorologiques contemporaines et d'égale minutie, que fussent rapprochés et comparés les phases de chaque crue et l'évolution du temps les accompagnant, et que ce qui a été fait ici pour une trentaine de crues le fût pour des centaines.

Cette analyse comparative qui tend à trouver les associations entre types de crues et types de temps est originale par rapport aux corrélations habituelles, telles par exemple celles des pluies et des débits. Les phénomènes naturels qui sont essentiellement qualitatifs sont réduits, dans une étude de corrélation à des rapports quantitatifs. La technique, à cet usage, est mathématique et plus, par ce moyen, sont découverts de nouveaux rapports entre les nombres plus il est facile de remarquer ces rapports subtils dans les choses naturelles. Il n'en peut pas être ainsi, actuellement du moins, quand les situations météorologiques ou les types de temps sont pris comme objet global de référence dans une étude de covariation. Une situation météorologique est une synthèse dont l'expression reste qualitative même si beaucoup de ses multiples et complexes composantes sont mesurables et mesurées. L'étude des covariations des débits et du temps sera donc un parallèle entre des valeurs quantitatives et des signes qualitatifs. Cela ne veut pas dire que les analyses en doivent être moins fines et les conclusions moins certaines car l'essence des choses est faite de plus de qualité que de quantité, mais que l'étude devra se faire plus attentive et scrupuleuse, privée qu'elle sera des sécurités parfois trompeuses qu'apportent les mécanismes mathématiques.

TROISIEME PARTIE

L'ABONDANCE

Toute étude hydrologique complète d'un ensemble fluvial s'épanouit et s'accomplit dans la présentation de ce qu'il est convenu d'appeler, par emprunt à la langue du commerce, le « bilan » moyen annuel d'écoulement qui est l'état comparatif des pluies et des débits durant un cycle complet des phénomènes, rythmé par les saisons. L'analyse des états ordinaires et des états critiques par lesquels le fleuve passe de la pénurie à l'abondance a pour fin essentielle de faire le bilan, de l'interpréter et, ultimement, d'expliquer le « déficit » c'est-à-dire la différence entre les pluies précipitées sur le bassin et les débits.

Il convient de rappeler à ce propos que, dans les valeurs de pluies et de débits qui apparaissent au bilan de l'abondance, il ne faut pas voir des expressions absolues de la réalité. Elles sont de simples outils destinés à suivre et à comprendre les changements des phénomènes et leurs corrélations. Pour cette raison, les relevés des pluviomètres et des stations de jaugeage seront retenus ici sans correctifs en dépit de leurs imprécisions reconnues. Tant qu'elles ne seront pas indiscutables, les plus prudentes corrections n'ajouteront que l'incertitude à l'imprécision (1).

En revanche, les raisons d'abandonner l'année civile pour un autre cadre annuel correspondant fidèlement, du début à son terme, au cycle des phénomènes considérés requièrent attention et examen. Pour arriver, en ce domaine des bilans de l'écoulement, à des approximations aussi poussées que possible, l'idée s'est fait jour, chez les hydrologues, de confronter écoulements et précipitations annuels au cours d'une année dite « hydrologique », suite de douze mois consécutifs (1er janvier-31 décembre, 1er février-31 janvier, 1er mars-28 février etc.) dont le début est choisi de façon telle que l'action des réserves et de la neige fausse le moins possible les rapports qui lient le module d'une année aux pluies contemporaines. Dans le cas du bassin étudié ici, convient-il d'abandonner l'année civile ?

(1) Au contraire, se référant aux observations sur les écarts entre pluie réelle et pluie mesurée (cf. 1ère partie, page 32), P. FONTAINE a proposé pour l'établissement des bilans une majoration des précipitations moyennes hivernales (octobre à avril) de l'ordre de 10 à 20 % en fonction d'un coefficient directement lié à la direction et à la vitesse du vent (P. FONTAINE, 1964).

— De même, P. PEDELABORDE (1968), dans une étude de bilan relative à un bassin normand, applique et recommande une majoration des pluies d'hiver en raison de la vitesse du vent en cette saison.

— M.C. COSANDEY (1970) adopte, tout en la critiquant, la valeur du coefficient proposé. Le coefficient, de toutes façons, ne modifierait guère les tendances obtenues sans lui puisqu'il n'impliquerait qu'une translation générale, dans un sens ou dans l'autre, de tous les relevés bruts.

Une étude expérimentale rigoureuse sur un nombre d'années suffisant n'est malheureusement réalisable que pour une vingtaine de bassins élémentaires représentant au total une faible superficie du bassin supérieur de la Loire. Pourtant, la connaissance des lois de l'écoulement en ces bassins a une portée pratique immédiate. Elle doit permettre de supputer, par voie d'analogies et de différences, comment se comportent les débits de ces rivières dont la mesure a été négligée.

Mais le souci le plus immédiat reste la connaissance des ressources en eau : l'attention devra donc, enfin, se porter sur l'expression la plus simple et la plus synthétique de l'abondance fluviale qu'est le module aux différentes stations du bassin.

CHAPITRE I

DE L'OPPORTUNITE D'UNE ANNEE HYDROLOGIQUE DANS LE BASSIN DE LA LOIRE

I. SENS DE L'EXPRESSION « ANNEE HYDROLOGIQUE »

Le terme d'année hydrologique désigne plusieurs concepts sans doute voisins, distincts cependant à raison de la réalité que chaque utilisateur a cherché, par elle, à saisir.

A. Dans la conception géographique la plus classique, adoptée ici, dont les principes ont été clairement exposés de longue date, notamment par A. COUTAGNE et M. PARDE, l'année hydrologique est la période de douze mois durant laquelle les bilans précipitations/débits sont les moins troublés par les rétentions d'une partie des eaux tombées avant le mois initial et leur restitution ultérieure. C'est, en d'autres termes, l'année dont la délimitation évite le plus les écarts à la courbe moyenne des rapports entre les modules particuliers (1) et les pluies contemporaines.

B. Plus récemment, une conception différente de l'année hydrologique est apparue pour les besoins des recherches entreprises en vue du bilan mensuel de l'eau dans le sol, d'un point de vue plus agrométéorologique que strictement hydrologique (2). A la suite des travaux de P. FONTAINE (3), des hydrologues de plus en plus nombreux délimitent de la façon suivante une année hydrologique ou plutôt un « cycle hydrologique pseudo-annuel », comme l'écrit M. CHARTIER (1966 a et b) : l'année hydrologique « commence le premier jour où les apports d'eau météorique sont définitivement supérieurs aux pertes et elle se termine le dernier jour où les pertes sont définitivement supérieures aux apports ». Suivant ce critère, il est logique que, d'une part, le cycle hydrologique ait des durées variables selon les années particulières et que, d'autre part, dans les régions de régime pluvial océanique, le cycle étant lié étroitement aux con-

(1) ceux d'une seule année.

(2) cf. P. CURE (1950), R. ARLERY, M. GARNIER, R. LANGLOIS (1955).

(3) cf. P. FONTAINE (1964 et 1969), P. CASPAR et J. DUCLAY (1964), A. ORIEUX, E. POUGET, A. BARBIA, H. SABADEL (1967).

ditions thermiques, il commence toujours à l'automne. Ainsi M. CHARTIER opérant sur le bassin de la Seine en amont de Paris, pendant trente ans, a pu fixer en moyenne le début d'un tel cycle hydrologique au 9 ou 10 octobre. A peu près de même C. COSANDEY (1970), étudiant les bilans mensuels sur le bassin normand de l'Odon et sur celui de l'Orgeval, en Brie, a pris « comme cadre de ses recherches non pas l'année légale mais l'année hydrologique commençant quand les précipitations réellement reçues par le sol deviennent supérieures à l'évapotranspiration potentielle c'est-à-dire, pour les bassins étudiés, en octobre ».

C. A cette définition de l'année hydrologique, notablement différente de la première, se rattache une troisième acception du terme, communément admise en matière d'exploitation hydroélectrique. Le découpage de l'année dans la zone tempérée est, là encore, fondé sur les variations de température et d'éclairage solaire. La consommation d'électricité est éminemment saisonnière : elle augmente pendant la saison froide à partir du mois d'octobre, époque charnière précisément où, d'une part entrent en sommeil les usines de haute montagne, surtout productrices de « chevaux de printemps et d'été » et où, d'autre part, les rivières de plaine atteignent généralement leur plus faible débit. Aux rythmes saisonniers de la production et de la consommation, doit s'accorder la gestion des réserves disponibles dans les retenues des barrages : octobre est, à cet égard, d'une pratique commode.

D. La définition purement statistique d'une année hydrologique significative commençant par un mois autre que janvier a une autre fin. En vue de soumettre les débits annuels particuliers à des traitements statistiques, corrélations par exemple, il est utile de rechercher le découpage de l'année, qui, pour un nombre d'années aussi grand que possible, procure les distributions les plus proches d'une distribution gaussienne. Des applications de cette méthode ont été présentées par P. BOIS en 1966 pour les modules de la Loire à Blois et, plus récemment, dans sa thèse (1968) où sont étudiés les modules d'une cinquantaine de rivières appartenant à des régions climatiques différentes. Dans ce dernier travail, l'auteur ne s'est pas borné à adopter simplement l'année pour laquelle les histogrammes de fréquences des modules particuliers sont les plus conformes à une distribution « normale » (4). Il a cherché aussi pourquoi certains découpages offraient des distributions significativement différentes de la loi de Gauss. Par un raisonnement fondé sur ces disparités et au terme d'une analyse purement statistique des débits mensuels parti-

(4) Pour la Loire à Blois, la meilleure distribution est celle de l'année commençant en octobre. Pour la Moselle à Cochem l'année commençant en janvier manifeste une excellente adéquation de la distribution des modules particuliers à la loi de Gauss tandis que celle qui commence en août est la plus mauvaise année selon le même critère.

culiers portant notamment sur les corrélations entre débits de mois consécutifs, P. BOIS est arrivé à mettre en évidence un critère statistique « objectif » (5). Sa meilleure année hydrologique, pour une rivière donnée, débute « lorsque la dépendance entre les débits mensuels est minimale » c'est-à-dire quand le coefficient de corrélation entre débits mensuels adjacents est le plus faible ou encore, ce qui est à peu près équivalent, quand les débits mensuels tendent à être égaux d'une année à l'autre. Pour les cinquante-trois rivières examinées par P. BOIS, dans vingt-huit cas l'année hydrologique commencerait en octobre, dans dix-sept cas en mars (dont la Loire à Blois, la Dore à Giroux et la Moselle à Cochem), dans deux cas en janvier, dans deux en mai comme en septembre, dans le cas de la Sioule à Pont-du-Bouchet en février, et en décembre pour le seul haut Tarn à Fontchalettes (67 km²). La fin recherchée dans une telle analyse statistique ayant convenance et pertinence par référence exclusive aux débits, il n'y a pas a priori de raison pour que l'année hydrologique la plus favorable statistiquement soit aussi celle qui donne les relations les plus groupées entre précipitations annuelles et modules contemporains. Les résultats atteints par P. BOIS invitent pourtant à chercher les raisons de coïncidence en certains cas et de discordance en d'autres.

Peut-être existerait-il d'autres raisons et donc d'autres manières de déterminer l'année hydrologique. Aujourd'hui, quand les auteurs, dans leurs diverses études de bilans se réfèrent sans autre précision à « l'année hydrologique », c'est de l'année commençant en octobre qu'il s'agit. Qu'ils aient quelque chance de toucher juste, cela est possible mais est-il si certain que le découpage d'usage soit à coup sûr toujours le meilleur, qu'il soit meilleur notamment que celui de l'année légale ? Des experts qui ne se rendent pas sans raison ont posé la question. A propos justement de bilans hydrologiques n'a-t-il pas été dit de A. COUTAGNE qu'il eut « le plus grand mérite en détruisant le dogme de l'année hydrologique universellement représentée par octobre-septembre » (M. PARDE, 1971) ?

Il faut donc, en l'espèce, se demander dans quelle hypothèse un tel choix est justifié, quel résultat donne une vérification systématique dans le bassin de la Loire et quelle conclusion pratique cette vérification appelle.

(5) En fait, P. BOIS a tenu compte du fait (vérifié d'ailleurs dans ce présent travail, p. 96 et figure 16) que les débits mensuels particuliers sont plutôt répartis suivant une loi de Galton et il a calculé la corrélation entre logarithmes des débits mensuels de mois consécutifs.

II. RAPPEL DES DIFFERENTES HYPOTHESES SUR LE CHOIX DE L'ANNEE HYDROLOGIQUE

L'idée de l'année hydrologique a séduit par la simplicité et la logique avec lesquelles elle se présentait comme un retour au réel. Voici, en effet, le fil du raisonnement.

Les causes qui tendent à retarder l'écoulement d'une partie ou de la totalité des eaux précipitées sont de deux sortes : d'une part, les caractères géomorphologiques et lithologiques du bassin dont dépendent la mise en réserve des eaux infiltrées et leur restitution ; et, d'autre part, les conditions thermiques qui règlent essentiellement l'évapotranspiration et la rétention nivale ou glaciaire.

Il est logique de penser que, dans les régions tempérées de l'hémisphère nord, soumises au mois de décembre à des conditions pluviales et thermiques très irrégulières selon les années, la rétention nivale et l'infiltration des eaux précipitées peuvent donner lieu en janvier et en février à des restitutions très inégales suivant les années et donc très perturbatrices pour les bilans particuliers de l'année astronomique qui commence le premier janvier. Aussi le début de la meilleure année hydrologique doit-il éviter les périodes où les deux types de réserves peuvent, par des restitutions très inégales, fausser les bilans apparents.

De là sourd la première hypothèse très vraisemblable que, dans les régions où le cycle saisonnier de l'écoulement comporte une période très nette de basses eaux (à condition qu'elles ne soient pas dues au gel hivernal), c'est immédiatement après cette période d'étiage que commence l'année hydrologique. A ce moment, les réserves ont toutes chanches d'être épuisées ou presque et, en conséquence, de ne point trop perturber le bilan. Sous les latitudes tempérées de l'hémisphère nord, il a été généralement admis que la meilleure année hydrologique débute en octobre. Dans certains bassins encore chauds et peu arrosés en octobre, le meilleur choix serait novembre-octobre ([6]). Au contraire, le début de l'année peut être avancé en septembre pour des bassins méditerranéens où des pluies très fortes peuvent tomber dès septembre ; il serait justifié, même en août, pour des rivières issues de bassins exposés à des refroidissements précoces dès la fin de l'été.

Ces dernières nuances introduisent déjà un doute sur l'universalité des situations dans la zone tempérée. Mais les conclusions de A. COUTAGNE,

([6]) C'est encore, par exemple, celle que retient, en suivant apparemment ce raisonnement, J. VEREESTRAETEN (1968, pages 709-715) pour la Meuse : « Pour éviter au maximum les reports d'une année à l'autre de l'effet perturbateur de la rétention et de la consommation des réserves, on peut prendre comme base des calculs non l'année civile mais une année hydrologique qui, pour les rivières du type pluvial-océanique comme La Meuse, commence le 1er novembre ».

quand il tenta de vérifier l'hypothèse en calculant les bilans particuliers successifs pour la Tamise, l'Aller, la Weser, furent décisives : les corrélations n'étaient pas meilleures que pour l'année civile quand le cycle annuel logiquement choisi débutait en octobre ou en novembre. Il eut alors l'idée que les corrélations précipitations/débits ont le plus de chance d'être bonnes non plus quand l'année commence au moment où les réserves sont les plus basses mais quand elles offrent le moins de différence d'une année à l'autre. Il peut être noté par parenthèse que les conclusions à base statistique de P. BOIS rejoignent celles de A. COUTAGNE. Le point de départ de l'année hydrologique pour les régions tempérées est, dans cette seconde hypothèse, la fin de la saison froide au cours de laquelle l'évaporation faible ou nulle laisse les précipitations remplir au maximum les vides souterrains. Cette conjecture fut heureusement vérifiée par des corrélations pluies/débits très satisfaisantes (0,96 - 0,90 - 0,94) pour la Weser, l'Aller et aussi la Tamise à Teddington en comparant les précipitations et les modules de mai à avril (7).

A partir de cette hypothèse cohérente, se révèlent de multiples possibilités d'années hydrologiques en fonction

— du régime pluvial,

— du régime thermique dans la mesure où le second facteur perturbateur qu'est la neige peut interférer dans un bassin avec les effets de la réserve souterraine,

— de la réserve potentielle par rapport aux pluies probables,

— de la vitesse d'infiltration et de restitution,

— de l'intensité des pluies etc.

C'est dire que le réel n'est pas simple. Avec A. COUTAGNE, M. PARDE, par une suggestive revue des phénomènes en jeu, fait s'imposer la conclusion que le problème doit être beaucoup plus complexe que ne le laissaient croire les hypothèses de départ. C'est aussi ce que laissent penser les trop rares vérifications tentées jusqu'ici.

Celle qu'a opérée J. LOUP à propos des bilans de l'Oum-er-Rebia est, il est vrai, peu convaincante pour deux raisons au moins. La première et la principale est que les relations entre pluies et débits sont très perturbées dans le cas particulier de cette rivière marocaine par les rétentions et les lentes restitutions karstiques. La seconde est que l'examen a porté sur sept années seulement (1948/1949 à 1954/1955). Dans l'ordre, les années les meilleures pour les corrélations précipitations/écoulement sont :

août-juillet,
juillet-juin,
septembre-août.

(7) M. PARDE (1964b) pense que le groupement avril-mars eut peut-être été meilleur mais les vérifications n'ont pu être faites. Suivant le critère de P. BOIS, l'année hydrologique devrait commencer en mars sur le bassin de la Tamise.

Or le raisonnement avait conduit les services hydrologiques marocains à fixer le début de l'année hydrologique le 1er septembre au moment où les réserves nivales et souterraines de l'année antérieure sont à leur point le plus bas à la fin de la saison sèche. Si J. LOUP avait pu étendre son examen à beaucoup plus de sept années, ses calculs auraient-ils corroboré ce choix empirique ?

Les résultats obtenus par E. INDRI (1955) sont beaucoup plus probants parce que sa recherche d'un véritable cycle hydrologique annuel a porté sur un ensemble de seize stations du bassin supérieur de la Piave en amont de Soverzene (1.690 km²) pendant vingt ans. Les particularités importantes du bassin tiennent

— à sa forte altitude moyenne (1.517 mètres), cause indirecte de perturbations pour les bilans en raison du rôle de la neige (mais pas de la glace cependant) (tableau n° 68) ;

— au régime des précipitations qui rappelle celui de certaines parties du bassin supérieur ligérien par la combinaison de deux rythmes pluviométriques : automne et printemps de type méditerranéen, été et hiver de type continental ([8]) ;

— à sa situation dans les Alpes dolomitiques, qui peut faire craindre a priori de fâcheux décalages entre les précipitations et l'écoulement à cause de la nature calcaire des terrains. En fait, les perturbations sont beaucoup moins graves qu'on ne pourrait s'y attendre car les rivières sont toujours installées sur le soubassement marneux et schisteux des calcaires dolomitiques qui couronnent seulement les interfluves.

Au terme d'une longue et subtile analyse statistique, qu'il n'est pas utile de détailler ici mais dont la figure 68 donne une rapide et expressive synthèse, l'auteur a obtenu une sensible amélioration dans les corrélations pluies/débits en substituant à l'année astronomique (1er janvier-31 décembre) celle qui commence le 1er octobre ([9]). Dans le tableau n° 68, les valeurs des coefficients de corrélation ont été transcrites pour chaque bassin.

Outre cette conclusion principale, l'étude de E. INDRI appelle deux autres remarques.

Malgré une ressemblance générale, l'allure variée des diagrammes traduit des disparités entre petits bassins voisins, qui tiennent probablement à des contrastes locaux dans la nature des terrains, les pentes,

([8]) Les hauteurs d'eau à Cortina d'Ampezzo (1.224 mètres d'altitude) au cœur de la région donnent une bonne image de ce régime pluviométrique : total annuel : 1.252 mm - hiver : 157 mm - printemps : 352 mm - été : *393 mm* - automne : 350 mm. Cependant, cette référence à un poste témoin n'est pas d'Indri qui utilise pour les corrélations pluies/débits les valeurs de pluie moyenne sur les bassins.

([9]) L'année hydrologique est déterminée suivant la méthode du Pr. TONINI (1948) fondée sur la recherche de ce que l'auteur appelle « le temps caractéristique d'écoulement » relatif à une période donnée (ici, le mois), celui pour lequel apparaît la meilleure correspondance entre les pluies et les débits.

l'altitude, l'enneigement, l'insolation, la couverture végétale. Mieux : de l'une à l'autre des stations échelonnées d'amont en aval sur la même rivière, la Piave, la différence peut aller jusqu'à deux mois pour le début de l'année hydrologique. Un autre caractère très net est la tendance à une amélioration générale, quoique secondaire, des bilans en mars-avril au point qu'à Soverzene, dernière station d'aval de la Piave (qui regroupe tous les bassins élémentaires), l'année hydrologique pourrait débuter aussi bien en mars qu'en octobre : seul le poids du contexte régional fait opter pour octobre. Tout ceci incline néanmoins à penser qu'une vérification portant sur un bassin isolé risque d'être beaucoup moins décisive qu'un examen étendu à un groupe de stations. Ce sera seulement au sein d'un grand ensemble régional que la dominante d'une année hydrologique pourra se dégager des divergences locales.

III. APPLICATION AU BASSIN DE LA LOIRE

A. Méthode

Pour rechercher la meilleure année hydrologique dans l'ensemble constitué par la Loire et ses affluents jusqu'à Gien, vingt-trois bassins, de 51 à 3.300 km² de superficie, ont été analysés, et les corrélations annuelles successives entre pluies et débits se rapportant à ces bassins ont été calculées pour les douze années possibles (1er janvier - 31 décembre, 1er février - 31 janvier etc.). Les pluies particulières (d'une année) prises en compte sont les pluies « moyennes » dans un souci de fidélité au réel mais, pratiquement, avec de fâcheuses inégalités car plus les bassins sont petits moins s'y comptent les pluviomètres et, donc, plus la mesure de la pluie est ponctuelle. Dans les bassins plus étendus, au contraire, une compensation s'établit entre des secteurs aux caractères morphologiques divers et soumis à des averses intenses mais localisées. Les degrés de précision dans l'évaluation des précipitations et des débits risquent d'y être mieux accordés. Cette disparité reconnue entre petits et grands bassins, il reste que la valeur intrinsèque de la liaison entre pluies et débits importe moins ici que la variation de cette liaison suivant l'année choisie.

Une autre réserve sur la valeur brute des résultats doit être introduite à propos des durées inégales sur lesquelles ont porté les calculs dans les divers bassins : de vingt à quarante-cinq ans pour la moitié des bassins ; de neuf ans au minimum à vingt ans pour l'autre moitié. Plusieurs sondages ont montré cependant que l'addition ou la soustraction de plusieurs années ne modifiaient pas fondamentalement le sens des résultats. L'exemple de Bas-en-Basset pour lequel les corrélations ont été calculées pour deux périodes, de vingt-cinq ans (1929-1954) et de quarante ans (1929-1968), en donne la preuve (cf. figure 69).

L'indice classique mesurant le degré de corrélation entre pluies particulières et débits contemporains est le coefficient R de la forme :

$$R = \frac{\Sigma\, x\, y}{\sqrt{\Sigma\, x^2 \times \Sigma\, y^2}}$$

x étant le rapport entre chaque variable de pluie annuelle particulière et la pluie « normale » ou moyenne ($x = \frac{Pn}{\bar{P}} - 1$),

y exprimant le même rapport pour les débits contemporains

$$(y = \frac{Qn}{\bar{Q}} - 1).$$

Pour rendre plus facilement comparables les valeurs prises par le coefficient de corrélation R, portées au tableau n° 69, elles ont aussi été exprimées graphiquement (figure 69). Les diagrammes de la figure 69 ont été conçus pour une comparaison immédiate avec les dessins de E. INDRI relatifs aux bassins élémentaires de la Piave. Bien que les phénomènes représentés ne soient pas identiques, plus la courbe se rapproche de la ligne de base dans les deux séries de diagrammes, meilleure est la corrélation entre pluies et débits : l'origine de l'année hydrologique est ainsi facile à repérer pour chaque bassin.

B. **Résultats**

Au delà d'une première impression déconcertante, inspirée par la variété des résultats, plusieurs tendances se dégagent.

— Les corrélations pluies/débits dans un cadre annuel autre que celui de l'année civile sont améliorées inégalement suivant les bassins. Pour cinq d'entre eux cependant, ceux du Vernazon au Crouzet, de la Virlange à Pouzas, de la Seuge à Saugues, de la Couze de Pavin à Saint-Floret et de la Couze Champeix aux Granges, la meilleure année reste l'année civile et, pour cinq autres, l'amélioration obtenue est négligeable : ceux de l'Allier à Lavalette (0,968 pour l'année commençant en mars et 0,961 pour l'année civile), de l'Ance du Nord à Laprat (0.80 pour l'année commençant en mars et 0,79 pour l'année civile), de l'Ance du Sud à Pouzas (0,82 pour l'année commençant en février et 0,79 pour l'année civile), de la Besbre à Châtel-Montagne (0,87 pour l'année commençant en décembre et 0,85 pour l'année civile), de la Loire à Bas-en-Basset (0,82 pour l'année commençant en avril et 0,79 pour l'année civile). L'amélioration est sensible dans la moitié environ des bassins et l'année commençant en janvier est la plus mauvaise des douze en deux stations seulement : à Langogne sur le Langouyrou (0,85 et 0,97 pour les années commençant respectivement en janvier et en septembre) et à Grandrieu sur un petit affluent du Chapeauroux (0,58 et 0,89 pour deux découpages contigus cependant, l'un commençant en janvier et l'autre en décembre).

— Si l'on adoptait l'année hydrologique commençant en octobre plutôt que l'année civile, l'amélioration serait maximale dans le seul bassin du Lignon vellave à Pont-de-Lignon. Elle serait encore sensible sur les premiers affluents de l'Allier, Langouyrou à Langogne, Chapeauroux, Grandrieu, Ance du Sud à Pouzas, Seuge et Sénouire, et sur l'Allier à Vieille-Brioude sans pour autant que cette année soit la meilleure pour les bassins autres que celui du Lignon du Velay. Tous ces bassins néanmoins appartiennent à la région dont le régime pluviométrique porte la marque méditerranéenne, quoique atténuée, d'une relative sécheresse estivale. Sauf pour le Lignon vellave, la séquence 1er septembre/31 août serait d'ailleurs plus avantageuse que celle du 1er octobre au 30 septembre.

— Si l'on optait cette fois-ci pour la seconde hypothèse, c'est-à-dire pour l'année commençant en mars, les chances de succès seraient beaucoup plus fortes puisque les corrélations seraient meilleures que pour l'année civile en treize bassins sur vingt-trois, non seulement ceux de la Loire à Bas-en-Basset, de la Sioule à Pont-du-Bouchet, de la Dore à Giroux, de l'Alagnon à Joursac, de l'Ance du Nord à Laprat, mais même encore pour ceux du haut bassin de l'Allier (Lavalette, Langouyrou, Chapeauroux, Ance du Sud et Sénouire). A coup sûr, l'ensemble du bassin relève plutôt de l'hypothèse suivant laquelle les corrélations pluies/débits ont plus de chances d'être meilleures quand l'année débute au moment où les réserves souterraines sont les plus fortes et les plus égales d'une année à l'autre. Malgré l'altitude, les rétentions et fusions nivales ne semblent pas trop perturbatrices au printemps, ce qui confirme d'ailleurs les conclusions antérieures sur la faible part relative, dans les débits fluviaux, de l'alimentation neigeuse.

— Cependant, la vérification systématique rend possible une analyse des fréquences, pour chaque année hydrologique, des meilleures et des pires corrélations pluies/débits. Les histogrammes de fréquences relatives des bonnes et des mauvaises années hydrologiques selon le mois initial choisi en sont le résumé graphique (figure 70). Ils apportent les précisions suivantes.

a) Les meilleurs coefficients de corrélation entre pluies et débits se rapportent, dans l'ordre, aux années qui commencent au début des mois de

décembre, janvier,
mars
et avril, d'une part,
et aux mois d'août,
de juillet, septembre et octobre, d'autre part,

dessinant deux bosses distinctes dans la distribution des fréquences.

b) Au contraire, les corrélations sont les plus fréquemment médiocres au cours des années qui commencent respectivement

en novembre
et octobre, d'une part,

et en avril
et mai, juin, d'autre part.

En quelques bassins, les coefficients de corrélation pour les mauvaises années s'abaissent au point de faire douter de la liaison entre les deux phénomènes étant donné le nombre de couples pluies/débits examinés ([10]). C'est le cas au Crouzet (Vernazon) où R = 0,53 seulement en octobre avec onze ans de données, à Chapeauroux également (R = 0,62 en novembre pour dix ans), à Châtel-Montagne sur la Besbre (R = 0,37 en septembre pour quinze ans), à Saint-Floret sur la Couze de Pavin (R = 0,28 en mai pour vingt-six ans), à Joursac sur l'Alagnon (R = 0,38 en août pour dix ans). Par conséquent, deux bosses se dessinent sur l'histogramme des mauvaises années, comme sur celui des meilleures avec un décalage général entre les deux séries : les années commençant en mai-juin et novembre ne sont nulle part un cadre annuel satisfaisant pour l'étude des corrélations pluies/débits et les années débutant en décembre, février et mars n'apparaissent en aucun cas mauvaises.

IV. INTERPRETATION DES RESULTATS ET CONCLUSIONS

Dans l'extrême diversité qui reste le caractère dominant de l'ensemble régional considéré (figure 71), il n'est pas aisé de saisir le rôle respectif, dans la production des mauvaises corrélations entre précipitations et modules particuliers, de chacune des causes efficientes possibles, la neige, la réserve souterraine et l'évapotranspiration, dont les effets, quand ils sont simultanés, se cumulent ou se contrarient suivant les cas.

A. La neige

En dépit de la forte altitude moyenne de la plupart des bassins, les alternances de rétention puis de fusion nivale ne perturbent guère les bilans particuliers puisque les années commençant par les mois d'hiver sont, dans l'ensemble, les meilleures années hydrologiques (tableau n° 70). Le fait n'est pas surprenant dans une région où la fusion de la neige compte relativement peu dans les débits fluviaux. L'alimentation pluviale y étant partout prédominante, le début de l'année hydrologique coïncide naturellement avec le maximum pluvial ou le suit de très près. Tous les bassins pour lesquels la meilleure année hydrologique commence en décembre et en janvier sont à la fois copieusement et régulièrement arrosés en hiver ; par exemple, le bassin du Vernazon, au Crouzet, reçoit en moyenne 761 mm de décembre à mai et le trimestre de concentration pluviale est s o N. Sur les bassins des couzes de Saint-

([10]) Le degré se signification de R peut être déterminé aisément sur l'abaque de LIORZOU (1961, page 123).

Floret et de Champeix et sur celui de l'Alagnon à Joursac, le maximum pluvial est en décembre (11). Comme les hauteurs de pluies sont très largement supérieures aux capacités des réserves souterraines, celles-ci sont vite remplies au maximum et donc peu variables d'une année à l'autre. La couverture neigeuse, habituelle dans ces hauts bassins, est épisodique et peut se manifester de novembre à mai sans que ses effets soient régulièrement perturbateurs en un moment de l'hiver plutôt qu'en un autre. Elle jouerait, au contraire, comme la réserve souterraine, un rôle plutôt régulateur des débits moyens hivernaux et printaniers.

B. La réserve souterraine

Les bassins dont la meilleure année hydrologique commence en mars ou en avril (Ance du Nord à Laprat, Allier à Lavalette, Dore à Giroux, Loire à Bas-en-Basset, Sénouire à Paulhaguet, Chapeauroux) sans d'ailleurs que l'avantage de cette année soit considérable par rapport à l'année civile, relèvent encore bien du même type de bassins dans lesquels les réserves ont le plus de chances d'être régulièrement proches de leur maximum pendant la saison froide. Seulement, le décalage de janvier en mars ou en avril pour la meilleure origine de l'année hydrologique s'explique ici par un changement dans les comportements relatifs de la réserve et de l'alimentation pluviale : le régime pluviométrique accuse désormais un minimum et non plus un maximum hivernal. Aussi, bien que le volume d'emmagasinement potentiel dans le sol soit faible et du même ordre que dans le premier groupe de bassins (probablement inférieur à 90-80 mm), les pluies de décembre, janvier, février sont en moyenne insuffisantes pour en assurer chaque année la pleine recharge dès janvier. Il faut attendre mars ou avril, qui sont d'ailleurs dans ces bassins des mois de recrudescence pluviale durant lesquels l'évaporation est encore trop faible pour soustraire au ruissellement ou à l'infiltration une forte part des précipitations. La comparaison des tranches d'eau précipitées et écoulées en moyenne pendant la saison froide sur deux bassins, l'un du premier groupe, celui de la Besbre (135 km² — 775 mètres d'altitude — début de l'année hydrologique en décembre) et l'autre du second groupe, celui de la Sénouire (159 km² — 912 mètres d'altitude — début de l'année hydrologique en avril) montre que la variabilité des réserves, même faibles, est dans la dépendance étroite de l'abondance pluviale (tableau page suivante).

(11) Le seul bassin de la Seuge fait exception, peut-être parce que les parties les plus élevées (pluviomètres de Montmouchet et de Paulhac-en-Margeride) n'ont pas été prises en compte dans le calcul de la pluie moyenne. Or, à Paulhac-en-Margeride (1.168 mètres), il semble que le régime pluviométrique présente un maximum d'hiver. Pour la décennie 1956-1965 comprise dans la période examinée pour la corrélation pluies/débits (1958-1965), la moyenne annuelle est de 1.029 mm, le trimestre et l'indice de concentration sont o n D et 1,19.

TABLEAU N° 71

COMPARAISON DES INDICES DE PRECIPITATIONS ET D'ECOULEMENT EN SAISON FROIDE, DANS LES BASSINS DE LA BESBRE A MAYET-DE-MONTAGNE ET DE LA SENOUIRE A PAULHAGUET

	Nov.	*Déc.*	*Janv.*	*Fév.*	*Mars*	*Avril*
BESBRE						
Précipitations (en mm)	95	112	104	88	93	93
Ecoulement (en mm)	53	70	88	69	72	59
SENOUIRE						
Précipitations (en mm)	62	56	50	44	46	56
Ecoulement (en mm)	37	73	42	38	55	39

Si l'on admet, par exemple, que les réserves peuvent varier de 20 à 60 mm dans les deux bassins selon les années, elles gêneront moins les corrélations dans le cas de la Besbre que dans celui de la Sénouire parce que leur rôle dans ce dernier bassin y sera plus grand relativement à l'abondance pluviale et à l'écoulement. Même faibles en valeur absolue, les restitutions influencent davantage les maigres débits de la Sénouire que ceux, mieux nourris, de la Besbre.

En été, quand la capacité d'accumulation des réserves est faible et que les pluies de saison chaude sont abondantes mais irrégulières — ce qui est le cas dans la plupart des bassins continentaux de la Loire supérieure (tableau n° 17) — réserves et restitutions ne peuvent qu'être fort inégales d'une année à l'autre : elles sont en étroite dépendance des pluies. Il s'ensuit normalement que les corrélations pour l'été sont mauvaises.

Finalement, la réserve souterraine qui s'est déjà révélée trop faible pour être vraiment efficace dans le bassin supérieur de la Loire lors des étiages ou des crues pèse peu, par ses variations, dans les bilans de l'abondance moyenne annuelle.

C. L'évaporation

La fréquence des mauvaises corrélations durant des années commençant en été ou à la fin des étiages est-elle une autre vérification du rôle déterminant de la pluviosité par rapport non seulement aux réserves souterraines mais aussi à l'évaporation ? En effet, si les écarts des évaporations particulières à la normale sont très forts par rapport à ceux des pluies, ils seront très perturbateurs. Cette condition se rencontre-t-elle ici ?

Les données décadaires et mensuelles sur l'évaporation au Puy et à Clermont-Ferrand, réunies depuis 1949 par la Météorologie Nationale,

renseignent utilement sur les variations de l'évaporation en ces stations (12). Les écarts maxima positifs et négatifs au Puy par rapport à la moyenne sont portés pour chaque mois dans le tableau n° 72. Ils montrent que l'amplitude de l'évaporation a atteint au maximum 75 mm pour le mois de juillet. Le trouble que peuvent apporter, dans les corrélations, les différences d'une année à l'autre dans l'évaporation est donc, au cœur du Velay, à peu près du même ordre que celui de la réserve souterraine. C'est dire qu'à l'instar de celle-ci, l'évaporation a une action modeste. Ce qui trouble principalement les corrélations demeure la forte irrégularité interannuelle des pluies mensuelles. Le fait que les années hydrologiques où les corrélations pluies/débits s'altèrent le plus dans les bassins de la Loire supérieure débutent en

septembre-octobre-novembre, d'une part,
en avril-mai-juin, d'autre part,

est à rapprocher des traits météorologiques dominants de ces deux saisons : fréquence élevée des types de temps violents, contrastés, instables, fortes variations de température et grosses averses. Serait-ce par ces violentes inégalités qu'il faudrait chercher à rendre compte des mauvaises corrélations entre pluies et débits ?

D. La pluie

Dès lors que, dans le bassin de la Loire supérieure, le facteur pluviométrique a une influence prépondérante dans la détermination de l'année hydrologique, l'examen des pluies révèle-t-il, à l'échelle régionale, les causes des grandes tendances communes (bonnes années commençant plutôt en hiver ou au début du printemps et mauvaises années commençant en mai-juin et octobre-novembre) qui transparaissent à travers les multiples disparités locales ?

Or, au lieu d'aboutir à une explication claire et simple, les deux sondages effectués sur les bassins de l'Ance du Nord et de la Borne montrent, au contraire, que les particularités locales de la pluviosité sont certainement aussi nombreuses que les bassins eux-mêmes, ce qui accroît en fait les données du problème et en complique la solution !

En effet, les principales conclusions d'une telle analyse qui n'avait jamais encore été faite sont les suivantes. La première est inattendue. Il était en général présumé que, quelle que soit l'origine de l'année, les histogrammes de pluies correspondant aux douze suites possibles de mois devaient présenter le même aspect, contrairement à ceux des modules. Car, si les débits de chaque mois peuvent être plus ou moins influencés par la mise en réserve d'une partie des précipitations et par

(12) Naturellement, les données brutes de l'évaporation mesurées à l'évaporomètre Piche sont de simples indices non directement comparables aux hauteurs des pluies. En revanche, l'amplitude de leurs variations est très significative.

leur restitution ultérieure, les précipitations, elles, ne sont pas sujettes à ces influences et il pouvait légitimement être supputé que les distributions des fréquences pour les douze années possibles seraient identiques. Pour les pluies, contrairement aux débits, aucune corrélation ne semblait devoir exister d'un mois à l'autre : les précipitations à l'échelle du mois ont un caractère indépendant et aléatoire ([13]).

Or l'analyse de la pluie moyenne sur les bassins de l'Ance du Nord et de la Borne fait apparaître que les précipitations annuelles particulières se groupent de façons diverses selon les douze délimitations possibles de l'année. Les histogrammes de la figure 72 (bassin de l'Ance du Nord) en sont l'illustration.

Le fait que les hauteurs de pluies sont la moyenne de plusieurs stations n'est pas la cause des disparités relevées dans les douze histogrammes. La même étude pour une seule des stations de chaque bassin, Viverols pour celui de l'Ance du Nord, le Puy pour celui de la Borne, montre que les dispersions n'y sont pas non plus indépendantes du mois initial choisi. Les écarts-types et les coefficients de variation pour les années ayant une origine et une fin différentes sont portés aux tableaux n° 73 et 74.

Cependant, seconde conclusion de ce sondage, les fluctuations régulières des écarts-types sont différentes non seulement pour les deux bassins examinés mais aussi à l'intérieur de chaque bassin pour la pluie moyenne et pour celle de la station témoin.

Si les dissemblances ainsi relevées peuvent paraître faibles pour apprécier exactement l'influence des disparités pluviométriques dans l'étude plus générale des corrélations entre précipitations et débits ([14]), il ne semble pas toutefois que les rythmes différents de leurs fluctuations puissent rester sans lien de causalité avec l'année hydrologique.

Plutôt que de borner, en l'espèce, la recherche à la seule hauteur des précipitations, sans doute serait-il plus fructueux d'appréhender les complexes météorologiques où s'insère la pluie. De fait, les mois successifs,

---

([13]) Pour la station du Puy, par exemple, l'analyse des corrélations entre pluies mensuelles des mois consécutifs a donné les résultats suivants, non significatifs, pour les douze couples de mois (janvier-février, février-mars, mars-avril etc.) :

0,207	0,196	0,203	−0,077	0,164	−0,011,
−0,090	−0,164	0,064	−0,051	0,107	−0,015.

(Calcul de P. BOIS en 1971.)

([14]) cf. 1ère partie, chapitre II. En effet, l'erreur type sur la moyenne $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ est peu inférieure à l'amplitude de fluctuation des écarts-types (pour le bassin de l'Ance du Nord, respectivement 18 mm $< \frac{\sigma}{\sqrt{n}} <$ 23 mm et amplitude maximum 32 mm,

pour le bassin de la Borne, 15-19 mm, d'une part, et 29 mm, d'autre part,
pour la station du Puy, 14-19 mm, d'une part, et 35 mm, d'autre part).

septembre-octobre-novembre ou avril-mai-juin, ont des particularités météorologiques très prononcées. Non seulement ils peuvent être tantôt très secs et tantôt très arrosés mais encore cette occurence de contraste est habituelle. Chacun de ces mois peut donc être précédé par des pluies extrêmement variables d'une année à l'autre et tous se distinguent par une forte pluviosité moyenne, ces deux caractères expliquant peut-être les différences de distribution dans les pluies annuelles suivant la suite de douze mois choisie. Ces situations météorologiques au sol sont elles-mêmes soumises aux types et aux singularités de la circulation atmosphérique en altitude, qui pourraient ultimement les expliquer.

En conclusion, dans l'ensemble du bassin, l'existence d'une année hydrologique qui garantirait les meilleures corrélations entre pluies et débits apparaît compromise. La cause en réside beaucoup plus dans les inégalités pluviales que dans les jeux combinés des mises en réserve, des restitutions et de l'évaporation. C'est seulement quand la tranche pluviale annuelle descend au-dessous de 900 ou 800 mm que les autres facteurs de l'écoulement (relief, altitude, exposition, couverture végétale), même médiocres et peu variés en valeur absolue, deviennent assez efficients pour engendrer des disparités locales.

Ainsi la comparaison exhaustive des corrélations pluies/débits établies pour toutes les séries d'années particulières aux délimitations différentes amène à conclure que l'adoption d'une année hydrologique ne se justifie pas. En effet, quel sens pourrait avoir, dans le cas du bassin supérieur de la Loire, l'abandon, comme cadre des bilans annuels, de l'année civile qui se révèle plutôt favorable à l'examen des corrélations pluies/débits dans la plupart des bassins élémentaires ? Et quelle autre année adopter pour un vaste bassin quand la détermination de l'année hydrologique, si laborieuse, si incertaine, change avec chaque petit bassin particulier ? Les bassins voisins, de la Borne, du Lignon vellave et de l'Ance du Nord, composant la moitié du bassin de la Loire à Bas-en-Basset donnent un exemple frappant de ces disparités locales. A Chadrac (Borne), la meilleure année hydrologique commence en *août* et la plus mauvaise en *avril* ; à Pont-de-Lignon, les origines respectives des bonne et mauvaise années sont *octobre* et *avril* ; à Laprat, *mars* et *juin* ; à Bas-en-Basset, *avril* et *novembre* !

N'en doit-il pas être de l'année hydrologique comme des idées préconçues que Pasteur comparait un jour au phare qui éclaire l'expérimentateur : « De telles idées, disait-il, servent de guide pour interroger la nature. Elles ne deviennent un danger que si on les transforme en idées fixes » [15].

[15] R. VALLERY-RADOT. La vie de Pasteur, page 262. Flammarion.

CHAPITRE II

PRECIPITATIONS ET DEBITS ANNUELS : LES BILANS D'ECOULEMENT DANS LES BASSINS TEMOINS

Les données empiriques de pluies et de débits à mettre en œuvre pour présenter un tableau général de l'abondance fluviale se prêtent à un double examen qui répond à deux préoccupations principales.

La première vise à mesurer le degré de liaison entre les débits et leur cause principale qu'est la pluie, cette dernière étant apparue dans le bassin de la Loire et en toutes circonstances non seulement déterminante mais aussi particulièrement irrégulière d'une année à l'autre à l'échelle annuelle comme à l'échelle mensuelle et à l'échelle journalière. L'étude des corrélations pluvio-fluviales est le premier moyen de caractériser et de nuancer les rapports entre les deux phénomènes.

Cependant, le lien de causalité, s'il est étroit, n'est pas rigide. Les valeurs des débits ne sont pas exactement proportionnelles à celles de la pluie parce qu'une quantité d'autres variables agissent simultanément : répartition saisonnière, nature liquide ou solide et intensité des précipitations, température, pluies et débits de périodes antérieures, autant de variables dépendant elles-mêmes de facteurs très variés, latitude, altitude, pente, exposition, nature interne ou couverture du sol... Les déficits et les quotients d'écoulement appréhendent globalement tous ces facteurs du débit. Leurs valeurs brutes en seront calculées et comparées dans une seconde étape essentiellement explicative.

I. CORRELATIONS PLUVIO-FLUVIALES ANNUELLES

A. Construction des droites de régression

L'existence de la liaison entre pluies et débits particuliers, sur un même bassin, est mise en évidence par un simple *diagramme de dispersion* où sont portés les indices annuels de précipitations et d'écoulement, chaque couple de valeurs x (pluies) et y (débits) relatif à un même année

représentant l'abcisse et l'ordonnée d'un point par rapport au système d'axes O*x* O*y*.

Au lieu de représenter, comme sur les figures 73, 74, 75 et 81 par exemple, les indices de pluies et de débits annuels en valeur absolue (hauteurs d'eau en mm), chaque année peut être caractérisée par sa pluviosité $\frac{x}{\bar{x}}$ (rapport de la pluie particulière à la moyenne annuelle globale) portée en abscisse et par l'hydraulicité contemporaine $\frac{y}{\bar{y}}$ portée en ordonnée : les diagrammes de bassins différents en sont rendus plus aisément comparables (figures 76, 77, 78 et 79).

Pour tous les bassins étudiés ici, les variations des débits sont en gros proportionnelles à celles des pluies : le nuage des points figuratifs s'allonge suivant une ligne moyenne plus ou moins inclinée par rapport aux axes du diagramme. Dès lors que la corrélation est linéaire, le procédé classique de l'ajustement par la « méthode des moindres carrés » permet d'établir l'équation de la *droite de régression* qui traduit le mieux, compte tenu de l'ensemble des observations, la liaison des deux phénomènes. Cette équation, si X désigne les écarts des pluies annuelles particulières à leur moyenne globale ($\frac{x}{\bar{x}} - 1$) et Y les écarts des débits contemporains ($\frac{y}{\bar{y}} - 1$), est de la forme générale :

$$Y = \lambda X \qquad \text{ou encore} \qquad X = \lambda' Y,$$

suivant que les pluviosités ou les hydraulicités sont prises comme bases de l'estimation. La droite de régression de Y en X (droite d'estimation moyenne des débits en fonction des pluies) a pour pente :

$$p = \frac{\Sigma XY}{\Sigma X^2}.$$

La droite de régression de X en Y (estimation des pluies en fonction des débits) a pour pente :

$$p' = \frac{\Sigma XY}{\Sigma Y^2}.$$

Les droites p et p′ passent toutes les deux par le point moyen du nuage, qui a pour coordonnées les moyennes des abcisses et des ordonnées mais ces droites sont distinctes et d'autant plus éloignées l'une de l'autre que la liaison entre pluies et débits est moins étroite. Pour que les deux droites de régression coïncident, il faudrait que leurs pentes soient telles que

$$pp' = 1 \qquad \text{ou encore} \qquad \frac{(\Sigma XY)^2}{\Sigma X^2 \times \Sigma Y^2} = 1$$

Or cette dernière expression constitue le carré du *coefficient de*

corrélation R, déjà rencontré au chapitre précédent : la superposition des deux droites se réalise donc quand

$$R = \frac{\Sigma XY}{\sqrt{\Sigma X^2 \times \Sigma Y^2}} = \pm 1.$$

Ainsi, sur les figures 76 à 80 où ont été portées les deux droites de régression de Y en X (trait plein) et de X en Y (trait pointillé), celles-ci se rapprochent davantage sur les diagrammes de bassins où la corrélation est forte (celui du Pont-de-Lignon par exemple où R = 0,86) (figure 77) que sur ceux où la corrélation est faible (Saint-Floret notamment où R = 0,52) (figure 79).

Pratiquement, la position optimale de la droite de régression devrait être intermédiaire entre celles de p et de p'. Il est logique et devenu habituel, cependant, à la suite de A. COUTAGNE (1948), d'adopter la droite d'estimation des débits en fonction des pluies :

dans la formule $Y = \lambda X$ ou encore $\left(\frac{y}{\bar{y}} - 1\right) = \lambda \left(\frac{x}{\bar{x}} - 1\right)$,

le coefficient λ est donc égal à $\frac{\Sigma XY}{\Sigma X^2}$.

Ainsi, pour chaque bassin, λ, d'une part, et R, d'autre part, caractérisent la liaison entre les indices pluvial et fluvial annuels. Ces paramètres ont l'avantage de donner une expression de la relation pluies/débits beaucoup plus nuancée et précise que la simple image, déjà éloquente, du groupement des points sur le diagramme de dispersion. Le coefficient λ, notamment, exprime, pour un bassin donné, les effets combinés du régime pluviométrique, de la température et de la rétention. Plus grand que 1, il indique que les variations fluviales sont amplifiées par rapport aux variations pluviométriques. Plus petit que 1, il signale, au contraire, un amortissement des variations de la pluie du fait des rétentions et de l'évaporation.

Le coefficient R renseigne plus particulièrement sur la qualité de l'ajustement à la droite de régression et, par conséquent, sur le degré de corrélation. Il permet ainsi de préciser, de part et d'autre de la ligne d'équation $Y = \lambda X$, une bande délimitant les fluctuations probables des débits annuels particuliers. La formule mathématique rigide ne donne, en effet, qu'une représentation schématique, approximative, de la réalité mais dès que les écarts ε entre les valeurs réellement observées et les valeurs calculées par la formule sont connus, la dispersion probable des débits particuliers autour de la droite de régression l'est aussi. Cette variable aléatoire, de distribution gaussienne, de moyenne nulle et d'écart type u (que les statisticiens nomment « le résidu quadratique moyen ») ajoute une précision sur la probabilité d'occurence à l'équation générale $Y = \lambda X$, liant les débits aux pluies : $Y = \lambda X$ (O ; u). Ce qui conduit à dire, par exemple, selon les lois de la probabilité, que la quasi

totalité (95 %) des points figuratifs se trouvent entre les deux droites d'équation

$$\left.\begin{aligned} Y &= \lambda X - 2\,u \\ \text{et}\quad Y &= \lambda X + 2\,u \end{aligned}\right| \quad \text{quasi certitude (Q.C.) de 95 \%}$$

et qu'il y a une chance sur deux pour que les points se situent dans une bande limitée par les deux droites

$$\left.\begin{aligned} Y &= \lambda X - 2/3\,u \\ \text{et}\quad Y &= \lambda X + 2/3\,u \end{aligned}\right| \quad \text{Q.C. 50 \%}$$

Le paramètre u, relié à la valeur réelle de l'hydraulicité et à R, est calculé suivant la formule :

$$u = \sqrt{\frac{\Sigma\,\varepsilon^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\Sigma\,Y^2}{n-1}}\,(1 - R^2),$$

n étant le nombre d'années considérées.

Pour le bassin de la Loire à Bas-en-Basset, par exemple, dont la pluie annuelle globale de 40 ans et les modules sont respectivement de 876 mm et 392 mm, la droite d'estimation des débits en fonction des pluies a pour équation :

$$y = 0{,}85\,x - 349$$

et, en délimitant les fluctuations probables des débits particuliers, cette équation générale devient :

$$\left.\begin{aligned} y &= 0{,}85\,x - 349 \pm 52 \\ y &= 0{,}85\,x - 349 \pm 156 \end{aligned}\right| \quad \begin{aligned} &\text{Q.C. 50 \%} \\ &\text{Q.C. 95 \%.} \end{aligned}$$

Les figures 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, relatives à différents bassins, représentent graphiquement les résultats obtenus par la même analyse des corrélations pluies/débits annuels.

B. Degré de corrélation dans le bassin de la Loire

1. *Le coefficient* λ

Pour tous les bassins portés au tableau n° 75, celui seulement de la Couze Pavin excepté, le coefficient λ qui lie $\left(\frac{y}{\bar{y}} - 1\right)$ à $\left(\frac{x}{\bar{x}} - 1\right)$ est supérieur à 1. Le fait que les écarts de l'hydraulicité soient, dans l'ensemble, supérieurs à ceux de la pluviosité confirme une fois de plus le faible rôle amortisseur d'un substratum peu propice aux rétentions durables et régulatrices des débits. Les valeurs plutôt élevées de λ, proches de 2 pour plusieurs, supérieure même à 2 dans le cas du Lignon vellave (2,30), indiquent en outre que l'amplification des variations fluviales par rapport aux variations pluviales est l'effet d'une évapotranspiration d'autant plus importante en valeur relative que la tranche

de précipitations moyennes annuelles est médiocre et que les pluies sont concentrées pendant la saison chaude.

En l'espèce, la comparaison des bassins qui se trouvent aux deux extrémités dans l'échelle des valeurs de λ, celui du Lignon vellave ($\lambda = 2{,}30$) et celui de la Couze Pavin ($\lambda = 0{,}90$) est très éclairante. Incontestablement, la Couze de Saint-Floret doit la faiblesse de son coefficient (pas excessivement faible toutefois) aux terrains volcaniques qui constituent la majeure partie de son bassin et qui atténuent, en conséquence, les variations pluviales. Le haut bassin du Lignon, au contraire, est non seulement beaucoup plus imperméable mais aussi et tout à la fois particulièrement dénudé, plus méridional donc plus chaud, nettement moins arrosé (tranche moyenne annuelle de 935 mm) que celui de la Couze Pavin (1200 mm), les précipitations étant surtout concentrées en été (cf. fiches de bassin). Alors que la hauteur des pluies de juin à novembre est à peu près la même en valeur absolue sur les deux bassins, les pluies de novembre à mai sont supérieures d'au moins 200 mm sur le bassin de la Couze.

Le bassin qui, après celui du Lignon vellave, a le coefficient λ le plus fort (1,90) est celui de la Sénouire à Paulhaguet. A cause de sa superficie de 159 km², il se prête encore mieux à la comparaison avec le bassin de la Couze Pavin (219 km²). La valeur élevée de λ s'y explique à la fois par l'imperméabilité des terrains exclusivement cristallins, la médiocrité de la pluviosité annuelle (767 mm) et le régime nettement continental des précipitations dont 430 mm tombent de juin à novembre et 337 mm seulement pendant la saison froide.

Pour donner à ces valeurs de λ une signification plus générale, il est utile

1° d'en chercher une expression synthétique, moyenne, pour l'ensemble régional que constitue le bassin de la Loire supérieure,

2° de les comparer aux valeurs obtenues, essentiellement par A. COUTAGNE, en d'autres bassins appartenant à des régions climatiques différentes.

En portant sur un même diagramme les trente points d'abcisses $\bar{x}$ et d'ordonnées $\bar{y}$ correspondant aux trente bassins élémentaires de la Loire supérieure pour lesquels l'analyse des bilans annuels a été possible, la corrélation linéaire pluies/débits à l'échelle régionale apparaît clairement. La droite, avec son degré d'indétermination, a pour équation :

$$\mathbf{Y} = 2{,}02\ \mathbf{X} + (0\,;\ 13{,}5)$$

sur le graphique de corrélation entre hydraulicité et pluviosité (fig. 80) et

$$y = 1{,}09\ x - 545$$

quand la confrontation porte sur les valeurs absolues de pluies et de débits (fig. 81).

Le coefficient λ moyen, 2,02, est sensiblement plus élevé qu'en maintes autres régions, ce que montre bien, au tableau n° 76, l'énumération des valeurs de λ pour quelques bassins (y compris ceux de la Loire supérieure) différents par la taille, la position géographique et la pluviosité. En général, le coefficient λ est d'autant plus faible que la capacité de rétention des terrains est plus forte mais il est vrai également — ce qu'avait déjà pressenti A. COUTAGNE — que sa valeur est liée en même temps à la pluviosité : il tend à s'élever quand l'abondance pluviale moyenne diminue ou, plus exactement, quand la part de l'évapotranspiration relativement aux pluies augmente.

Dans un contexte encore plus large que le précédent, le diagramme de la figure 82 rapproche l'ensemble des trente bassins ligériens d'autres corrélations pluvio-fluviales régionales. A part celles de la Loire et de la Belgique, toutes les droites ont été établies par A. COUTAGNE (1954). Pour les fleuves belges, l'équation a été calculée ici d'après les données réunies par L.J. TISON (1955) et transcrites au tableau n° 77. La pente relative à la Loire supérieure a l'une des plus fortes valeurs de λ, du même ordre que celles de la Belgique, de la Suède et du Wurtemberg (en hiver).

2. *Le coefficient de corrélation* R

Quant aux coefficients R, ils témoignent d'une liaison plus ou moins lâche, suivant les bassins, entre les précipitations annuelles et les débits particuliers contemporains (1). Dans l'ensemble, toutefois, les corrélations sont plutôt médiocres : six bassins seulement sur vingt et un ont un coefficient R supérieur à 0,90 ; cinq coefficients sont compris entre 0,80 et 0,90 et pour dix bassins, soit presque la moitié, R est inférieur à 0,80.

Il est difficile de fonder sur ces valeurs de R une comparaison rigoureuse des différents bassins car le nombre d'années prises en considération n'est pas le même partout si bien que des coefficients de 0,75, par exemple, pour la Sénouire à Paulhaguet, et de 0,76 pour le Chapeauroux à Chapeauroux indiquent en fait une corrélation meilleure sur le premier bassin (Paulhaguet) où les observations s'étendent à 25 années que sur le bassin du Chapeauroux où elles couvrent dix années seulement. Néanmoins, compte tenu de la durée des observations, les coefficients de corrélation de

0,76 à Chapeauroux (2),
0,65 à Vieille-Brioude (Allier),
0,52 à Saint-Floret (Couze Pavin)

sont, de tous, les moins satisfaisants.

(1) cf. tableau n° 78.

(2) Il faut toutefois rappeler que le bassin du Chapeauroux est un de ceux pour

Le diagramme de dispersion à Saint-Floret (fig. 79) ne laisse aucun doute à cet égard. Ainsi, les hydraulicités $\frac{y}{\bar{y}}$ en 1951 et en 1964 ont pu être respectivement de 1,67 et de 0,58 pour des pluviosités très voisines : $\frac{x}{\bar{x}} = 1{,}05$ et 1. Les bandes d'estimation des débits probables en fonction des précipitations sont si larges ($u = 23{,}1$) qu'elles n'ont plus grande utilité. A coup sûr, la capacité de réserve hydrogéologique qui est ici plus grande qu'en aucun autre bassin élémentaire (substratum à 68 % volcanique) joue un rôle majeur dans cette perturbation des corrélations annuelles pluies/débits, même si elle n'est pas suffisante pour compromettre entièrement la liaison entre les deux phénomènes.

L'examen des années particulières qui s'écartent le plus de la droite de régression en donne la preuve. L'année 1951, de relative abondance (hydraulicité = 1,39), succède à un étiage particulièrement sévère de l'été 1950. Seulement, en novembre 1950, une large part de précipitations abondantes a été soustraite au ruissellement par l'action conjuguée des réserves souterraine et nivale, et restituée au début de l'année suivante comme le montre le rapprochement des indices de pluie et d'écoulement pour chacun des mois de cette saison froide 1950-1951 :

	O	N	D	J	F	M	A	M
Précipitations à Besse-en-Chandesse (en mm)	69	209	57	47	95	126	81	141
Ecoulement à Saint-Floret (en mm)	10	123	67	95	104	177	150	139

En 1965, la mise en réserve puis la restitution ultérieure agissent en sens inverse : l'année se distingue (figure 79) par une forte pluviosité (1,68) et une hydraulicité un peu plus que moyenne seulement (1,16). C'est que les précipitations particulièrement abondantes des deux derniers mois de cette année (318 mm + 291 mm) n'ont pas entièrement ni immédiatement profité à l'écoulement de 1965 (débit de 114 mm en novembre et de 204 mm en décembre) mais à celui de 1966. En toutes saisons, d'ailleurs, cette réserve souterraine sur le bassin de la Couze Pavin se révèle perturbatrice des corrélations entre pluies et

lesquels l'adoption d'une « année hydrologique » améliore les corrélations pluies/débits (R = 0,84 pour l'année commençant en avril et R = 0,76 pour l'année civile).

débits mais plus encore en été qu'en hiver : les « meilleures années » hydrologiques commencent en janvier, février, mars, novembre et décembre. Alors qu'en hiver, les précipitations sont suffisamment abondantes pour assurer un remplissage du sol régulier d'une année à l'autre, en été, au contraire, les pluies, pareillement abondantes, sont trop entamées par l'évapotranspiration et trop irrégulières pour remplir également chaque année les larges vides souterrains ; le coefficient R en arrive même à perdre toute signification quand les corrélations sont étudiées dans le cadre des « années hydrologiques » commençant par des mois d'été.

La faiblesse du coefficient de corrélation (R = 0,65) constatée sur le haut bassin de l'Allier à Vieille-Brioude ne peut être imputée à la même cause que sur le bassin de la Couze Pavin (cf. fiche de bassin). Peut-être faut-il incriminer en partie l'inexactitude de l'indice pluvial adopté dans le calcul des corrélations : sur une surface réceptrice de 2.260 km², aussi contrastée morphologiquement et climatiquement que ce bassin, la connaissance de la pluie moyenne de chaque année est approximative quand elle est fondée sur les données de pluviomètres-témoins, si nombreux soient-ils, et non sur les cartes d'isohyètes (²). Cependant, cette incertitude sur la connaissance de la pluie n'explique pas tout. La médiocrité des corrélations sur des surfaces plus petites, voisines ou même comprises dans le bassin de l'Allier, et pour lesquelles l'indice pluvial est plus sûrement connu, indique bien que le trouble apporté dans les corrélations pluies/débits est un trait constant de l'hydrologie régionale. Pour les bassins du Chapeauroux, de l'Ance du Sud, de la Sénouire, de la Couze de Champeix, de la Dore, de la Borne, de l'Ance du Nord et le grand bassin de la Loire à Bas-en-Basset (3.300 km²), d'une part, les coefficients R compris entre 0,75 et 0,80 sont faibles et, d'autre part, le paramètre u qui donne la mesure des écarts probables à la droite de corrélation est élevé (maximum de 28 pour la Sénouire, 26 pour le Chapeauroux et l'Allier, 20 pour la Loire à Bas-en-Basset, 18 pour l'Ance du Nord et la Borne). Tous ces bassins ont en commun, au cœur du Massif Central, leur relatif abritement topographique, leur « continentalité », leur pluviosité annuelle irrégulière et médiocre pour une altitude en moyenne élevée. Les facteurs de l'écoulement, autres que la pluie, y prennent relativement à x et à y (ou P et P′) une importance bien plus grande que sur les

(²) Pour la recherche de la meilleure année hydrologique (chapitre précédent), le calcul de la pluie moyenne a été effectué d'après les relevés de onze stations pluviométriques : Chaudeyrac, Langogne, Grèzes, Thoras, Siaugues, Pinols, Les Uffernets (Saint-Paul de Tartas), le Bouchet Saint-Nicolas, Châteauneuf-de-Randon, Masméjean, Saint-Etienne de Lugdarès. Finalement, la corrélation entre P et Q est apparue bien meilleure avec la moyenne des pluies aux trois postes de Châteauneuf-de-Randon, Siaugues et Fix-Saint-Genès, qui sont cependant loin d'être représentatifs de tout le bassin.

cf. 1ère partie, chapitre III, I : Evaluation du volume d'eau précipitée sur un bassin versant et spécialement ce qui concerne le bassin de l'Allier à Vieille-Brioude.

bassins où les précipitations et donc les débits sont beaucoup plus abondants. Ce sont ces facteurs qui rendent compte de la fréquence et de la gravité des écarts entre les modules particuliers et les droites moyennes de régression. Ils sont mis globalement en évidence dans les déficits et dans les quotients d'écoulement.

II. DEFICITS ET COEFFICIENTS D'ECOULEMENT

Dans l'examen général des relations entre précipitations et débits, l'étude du déficit met l'accent sur le troisième terme du bilan hydrologique,

$$D = P - P'$$

c'est-à-dire la différence entre la hauteur d'eau reçue par un bassin en une période donnée et l'écoulement dans la rivière issue de ce bassin pendant le même temps. La cause principale du « déficit » est ce qu'il est convenu d'appeler l'« évapotranspiration », somme de l'évaporation physique qui atteint directement l'eau d'origine pluviale et de la consommation par les plantes pour leur croissance et leur survie.

Quel que soit le laps de temps considéré, le calcul du déficit par différence entre pluies et débits contemporains ne donne jamais, sauf par hasard, une valeur exacte de l'évapotranspiration ayant agi sur les pluies considérées. L'écoulement vers la rivière des eaux pluviales est toujours retardée par l'imbibition des couches superficielles du sol, par la stagnation dans des mares, lacs ou champs d'inondation, par les obstacles qu'opposent au ruissellement les saillies du sol et de la végétation, sans parler des retenues nivales et des mises en réserve profondes. C'est dire que l'évapotranspiration s'exerce, sur les précipitations d'une période donnée, pendant mais aussi après cette période.

Ce serait donc une erreur d'assimiler le déficit d'une année, par exemple, à l'évapotranspiration ayant réellement entamé les précipitations de la même année. Le bilan est une approximation d'un certain ordre : y sont purement et simplement « comptabilisés » les pluies, les débits et l'évapotranspiration pendant la même tranche de temps, les phénomènes postérieurs et antérieurs relevant d'une marge d'erreur acceptée par nécessité. C'est l'une des raisons expliquant les différences entre déficits résultant des bilans et valeurs d'évapotranspiration réelle calculées par des formules tenant compte uniquement des mécanismes physiques et physiologiques « normaux » ou « moyens » dans telles ou telles conditions naturelles. L'erreur qu'implique le bilan peut d'ailleurs être fort réduite en certains cas.

Si le retard de l'écoulement sur la pluie est régulier ou à peu près chaque année, l'erreur est faible à l'échelle annuelle. Elle reste encore négligeable si la période d'observation est très longue par rapport au temps de retard en une station donnée ; dans ce cas, le déficit d'écoule-

ment se rapproche, en valeur, de l'évapotranspiration vraie. En effet, quand le bilan est établi pour un grand nombre d'années, la différence entre la restitution dont bénéficie l'écoulement au début de la première année et la mise en réserve à la fin de la dernière année étant divisée par un grand nombre d'années, n'influence guère les moyennes de P, P′ et D dans le bilan global. Il est dès lors loisible, chaque fois que de grandes séries sont disponibles, de se placer dans les conditions de la meilleure approximation : telle est la vertu des valeurs globales du déficit.

Il reste cependant qu'en chaque bassin et dans les cas particuliers des bassins de la Loire supérieure où ni la réserve souterraine ni la rétention nivale ne perturbent gravement les corrélations pluies/débits, les déficits annuels particuliers renseignent de façon plus détaillée et plus concrète sur les conditions régionales de l'évapotranspiration et de l'écoulement.

A. Bilans particuliers

1. *Variabilité des déficits particuliers*

Les diagrammes de dispersion des déficits particuliers en fonction des précipitations sur quelques bassins ligériens (figures 83 a à m) mettent en évidence la variabilité du déficit annuel. Pour le bassin de la Loire à Bas-en-Basset, alors que le déficit moyen global est de 484 mm, le déficit particulier a été, en 1960, de 620 mm et, en 1932, de 260 mm seulement. Pour le bassin du Lignon vellave, la moyenne étant de 428 mm, les deux valeurs extrêmes de déficits particuliers sont 592 mm en 1953 et 188 mm en 1941. L'écart peut être encore plus grand sur d'autres bassins, tel celui du Chapeauroux avec 694 mm en 1950 et 141 mm en 1946.

a) Appréciation comparative de la variabilité

Il n'est possible de juger de cette variabilité que par comparaison avec d'autres ensembles hydrologiques. Pour ce faire, le rapport des déficits extrêmes particuliers est révélateur. Ses valeurs, pour quinze bassins élémentaires, ont été rassemblées dans les tableaux 79 et 80. Le premier présente, côte à côte, les rapports significatifs entre maxima et minima des précipitations annuelles, puis entre les chiffres extrêmes des écoulements, enfin entre ceux des déficits. Dans le second, seule a été retenue la variabilité des déficits en regard de laquelle ont été rappelés les grands traits propres à la configuration et à la pluviosité de chaque bassin.

Le rapport des déficits extrêmes particuliers dépasse 2 pour douze bassins sur quinze et 3 dans presque la moitié des cas. Il atteint 5,70 pour la Loire à Rieutord. En d'autres bassins de la zone tempérée, les rapports des déficits annuels réunis par M. PARDE pour des périodes variant de onze à vingt ans sont compris entre 1,50 et 2,20 et, calculés sur un demi-siècle, ils s'échelonneraient peut-être entre 2 et 2,50 :

Arno à San Giovanni alla Vena	(13 ans)	1,48
Meramec (Missouri) à Steelville	(10 ans)	1,50
Susquehanna à Harrisburg	(13 ans)	1,67
Shannon (Irlande) à Killaloe	(44 ans)	1,78
Tarraro (Italie) à Montecastello	(15 ans)	1,80
Alleghany à Franklin	(13 ans)	1,82
Tennesse à Chattanooga	(54 ans)	1,87
Weser et Aller réunies	(20 ans)	2,03
Mississipi supérieur à Keokuk	(57 ans)	2.08
Tamise à Teddington	(45 ans)	2,23
Red River du Nord (Dakota à Grand Forks)	(53 ans)	2,27

Pour d'autres bassins, le rapport des déficits extrêmes particuliers est nettement plus élevé. C'est le cas, par exemple, de rivières du Texas, Pedernales à Stonevall (2,48 en neuf ans) et Guadelupe à Spring Branch (3,13 en douze ans) ou du Tibre à Baschi (2.75 en treize ans) ou encore de cours d'eau sardes, Liscia à Liscia M.P. (2,46 en treize ans) et Rio di Oschiri à Concarabella (3,28 en quatorze ans). Mais alors les forts écarts ont pour cause des évaporations réelles particulières très inégales en raison de la température et des précipitations très variables dont les minima annuels peuvent être très médiocres : 305 et 333 mm sur les bassins de la Pedernales et de la Guadelupe texiennes, 441 mm sur celui du Tibre en amont de Baschi.... En aucun des petits bassins ligériens, bien moins chauds, les pluies annuelles particulières n'ont été aussi faibles (tableau n° 79). Les minima ont été enregistrés sur le bassin du Chapeauroux, certes méridional, mais à une altitude moyenne de 1.205 mètres, avec 500 mm en 1946, et sur le bassin de la Borne avec 577 mm en 1949.

Les rapports entre déficits particuliers extrêmes atteignent en général les valeurs les plus fortes dans les bassins où le pouvoir d'accumulation d'une partie des eaux précipitées est très grand : ceux de la Néra dans l'Apennin calcaire, par exemple, 7,45, ou de la Pescara à Santa Teresa sa voisine, 5,43, mais aussi ceux des régions enneigées (Swir en Finlande : 3,74 pour quarante-huit ans). Quant aux bassins englacés, les valeurs des déficits n'y ont plus aucune chance de renseigner utilement sur les bilans d'écoulement puisqu'ils n'ont pratiquement plus de rapport avec les évapotranspirations vraies.

Les écarts les plus forts enregistrés sur les bassins de la Loire à Rieutord (5,70), du Chapeauroux (4,92), de la haute Besbre (4,26), de l'Allier à Lavalette (3,94), du haut Lignon forézien à Rory (3,58) ne sont sans doute pas indemnes d'exagérations du même genre causées par les précipitations nivales, si inégales en volume et irrégulières dans leur maintien au sol selon les années sur les sommets du Massif Central.

Il est, par parenthèse, significatif que les quotients d'écoulement $\frac{P'}{P}$ qui sont généralement reconnus comme plus irréguliers que les déficits

particuliers deviennent, au contraire, sur ces bassins précisément, moins variables, comme le montrent les valeurs suivantes extraites du tableau n° 79 :

bassin	*rapport des déficits extrêmes particuliers*	*rapport des quotients d'écoulement extrêmes particuliers*
Loire à Rieutord	5,70	1,48
Chapeauroux à Chapeauroux	4,92	3,60
Besbre à Mayet-de-Montagne	4,26	2,08
Allier à Lavalette	3,94	1,85
Lignon du Forez à Rory	3,58	1,75

La petite taille des bassins, leur forte pente, l'imperméabilité de leur sol, assurent, après chaque averse, l'évacuation rapide d'une bonne partie des eaux dans la rivière : le rapport des écoulements aux précipitations est, en conséquence, relativement stable, plus stable certainement que les prélèvements additionnés de l'évaporation, de la transpiration, de l'infiltration — c'est-à-dire le déficit — qui varient énormément d'une saison à l'autre et même d'un jour à l'autre au cours d'une même saison selon les conditions de la végétation, de l'humectage du sol, de la température, de la couverture neigeuse, de l'humidité de l'air et de la vitesse du vent. Le coefficient d'écoulement sur de tels petits bassins bien arrosés, en moyenne montagne, est certainement plus utile à l'évaluation des débits que les valeurs extrêmement variables du déficit.

Au terme de cette comparaison et en retenant, avec le bassin de la Loire à Bas-en-Basset, le territoire le plus représentatif de l'ensemble régional étudié à cause de sa superficie de 3.300 km² qui intègre sept petits bassins élémentaires et aussi parce que l'analyse y a porté sur quarante ans, le rapport des déficits extrêmes particuliers de *2,40* apparaît légèrement supérieur aux valeurs les plus fréquemment rencontrées en zone tempérée.

b) **Inégale variabilité d'un bassin à l'autre**

Les variations des déficits d'une année à l'autre n'ont pas la même ampleur dans tous les bassins. Ainsi, la Seuge à Saugues et le Lignon du Forez à Rory drainent des superficies équivalentes (115 km²) dont l'altitude moyenne est identique (1.148 et 1.140 mètres) mais le rapport des déficits extrêmes est de *1,58* à Saugues (495 et 314 mm) et de *3,58* à Rory (508 et 142 mm). Cette inégale amplitude entre les valeurs extrêmes s'explique-t-elle par les différences dans la pluviosité, plus abondante sur le bassin du Lignon (1.170 mm de moyenne annuelle) que sur celui de la Seuge (855 mm) ? Dans ce dernier cas, la médiocrité des précipitations

particulières maximales (1.020 mm) pourrait bien faire obstacle à un déficit plus fort que favoriseraient les températures du bassin ; en revanche, sur le bassin du Lignon forézien, l'alimentation pluviale (maximum particulier de 1.560 mm) est meilleure, en sorte que l'élévation du déficit record à 508 mm, au lieu de 495 mm sur la Seuge, peut avoir là sa raison d'être. Néanmoins, cette différence de 13 mm d'un bassin à l'autre entre les déficits records reste faible en regard des chiffres de la pluviosité.

D'ailleurs, ce ne sont pas les écarts positifs (valeurs les plus fortes par rapport à la moyenne globale : 1,27 pour la Seuge et 1,32 pour le Lignon) ou, en d'autres termes, le numérateur du rapport des valeurs extrêmes particulières, qui rendent compte de la différence entre les deux bassins, ce sont les écarts négatifs (0,80 pour la Seuge et 0,37 pour le Lignon) ou le dénominateur : le déficit le plus bas est de 142 mm seulement sur le Lignon alors qu'il n'a jamais été inférieur à 314 mm sur la Seuge. L'explication réside ici dans les disparités morphologiques. Malgré une même altitude moyenne, la pente générale est beaucoup plus forte sur le bassin du haut Lignon, accroché au flanc oriental du massif forézien, que sur les hauts plateaux en paliers de la Margeride parcourus par la Seuge en amont de Saugues (dénivellations respectives de 1.018 mètres et de 565 mètres) (cf. fiches de bassin). Une concentration plus rapide des eaux de ruissellement est également favorisée dans le cas du Lignon par la forme même du bassin et le dessin du réseau hydrographique (indice de compacité Kc = 1,10 pour le Lignon et 1,17 pour la Seuge (4)). Enfin, les arènes sont moins épaisses sur le premier bassin que sur le second si bien que, au total, les eaux de ruissellement, plus rapidement évacuées sur le bassin du Lignon, sont aussi, en moyenne, moins affaiblies par l'évapotranspiration. En confirmation, le quotient d'écoulement $\frac{P'}{P}$ qui est aussi un bon indice du phénomène oscille, selon les années, entre 0,36 et 0,69 pour la Seuge tandis que, sur le Lignon, il n'a jamais été inférieur à 0,50 et a atteint 0,88 en 1963.

D'autres bassins se prêtent à des comparaisons du même genre, ceux, par exemple, du haut Lignon vellave à Chambon s/Lignon et de la Besbre en amont de Mayet-de-Montagne, de superficie, de pente générale et d'abondance pluviale moyenne très comparables.

rivière	*bassin versant*	*dénivellation*	*pluie moyenne annuelle (mm)*	$\frac{P \text{ annuelle max.}}{P \text{ annuelle min.}}$
Lignon vellave	147 km²	829 mètres	1018 (sur 13 ans)	2,16
Besbre	135 km²	817 mètres	1152 (sur 25 ans)	1,96

(4) cf. 1ère partie, chapitre III, page 74.

Les variabilités interannuelles des déficits y sont, en revanche, très différentes :

1,84 sur le Lignon (max. : 573 mm et min. : 313 mm),
4,26 sur la Besbre (max. : 668 mm et min. : 167 mm),

sans que des disparités morphologiques interviennent (cf. fiches de bassin) comme dans l'exemple précédent. Le quotient d'écoulement global est d'ailleurs le même : 0,56 pour le Lignon du Velay et 0,57 pour la Besbre. Deux causes principales se conjuguent cette fois-ci.

D'abord, l'altitude moyenne du bassin de la Besbre (775 mètres), beaucoup plus basse que celle du Lignon (1.160 mètres), implique des températures plus élevées et, par conséquent, une plus grande évaporation : les déficits particuliers maxima sont de 668 mm sur le bassin de la Besbre (rapport à la moyenne : 1,35) et de 573 mm sur celui du Lignon (rapport à la moyenne : 1,28). En second lieu, les régimes respectifs de température et de pluie expliquent qu'à une altitude pourtant plus élevée, les déficits minima du Lignon soient très supérieurs à ceux de la Besbre (313 mm et 167 mm). Le contraste des atmosphères estivales, d'une part sur les espaces dénudés du « balcon » vellave soumis aux ardeurs méditerranéennes (régime saisonnier des pluies, selon l'indice de Péguy, s o N - 1,40, avec cependant des pluies non négligeables en été : 243 mm), d'autre part dans les vallons frais et boisés des Bois Noirs et des Monts de la Madeleine (indice de Péguy, A m j - 1,12 et 318 mm de pluie en moyenne pour trois mois d'été) emporte de soi que le déficit annuel peut, certaines années, être beaucoup plus faible dans le second bassin que dans le premier, celui du Lignon.

Avec la Loire naissante à Rieutord, après 62 km² seulement d'un bassin versant situé à 1.290 mètres d'altitude moyenne, en forte pente (539 mètres de dénivellation) et abondamment arrosé (1.625 mm de pluie moyenne annuelle pour les quatorze dernières années), apparaît le plus fort des écarts entre déficits particuliers extrêmes dans le bassin supérieur de la Loire : *5,7*, à cause des écarts tant positifs (maximum particulier de 684 mm en 1959) que négatifs (minimum de 120 mm en 1955). Pourtant, cette petite portion du bassin appartient bien à la même province hydrologique que le haut bassin du Lignon vellave où l'écart entre déficits extrêmes particuliers est beaucoup plus faible (*1,84*). Plus élevé que celui du Lignon, ce petit bassin torrentiel est aussi beaucoup plus arrosé en toutes saisons. A cette forte altitude, quand l'été est particulièrement pluvieux, l'ensoleillement est médiocre, la température plus basse, donc le déficit moindre. Que la sécheresse et la chaleur prévalent au contraire comme en l'été de 1959, l'année d'emblée se distingue par un fort déficit (684 mm) nonobstant une pluie totale annuelle plus forte (1.785 mm) que la moyenne (1.625 mm).

Multipliées, analyses et comparaisons de bassin à bassin font apparaître les causes qui concourent à la variabilité des déficits particuliers en com-

positions, en dosages, en équilibres de plus en plus subtils et quelquefois déconcertants. Comment se fait-il, par exemple, que le bassin du Vernazon, presque jumeau de celui de la Loire à Rieutord (51 km², altitude moyenne de 1.230 mètres, pluie moyenne annuelle de 1.540 mm, quotient d'écoulement de 0,78 au lieu de 0,77 pour la Loire) ait des déficits particuliers beaucoup moins variables (rapport des valeurs extrêmes particulières : *3,1*) que ceux de la Loire voisine (rapport des valeurs extrêmes particulières : *5,7*) ? Faut-il tout simplement et facilement mettre en doute la valeur des mesures de pluie et de débit, ou chercher dans les profils hypsométriques la cause des disparités constatées (cf. fiches de bassin) ? Près de 20 % du bassin de la Loire en amont de Rieutord se développent entre 1.400 mètres et 1.551 mètres, tranche d'altitude à peine représentée (3 %) sur le bassin du Vernazon. La réserve neigeuse est-elle plus abondante et plus tenace sur le bassin de la Loire au point d'imprimer aux déficits particuliers une variabilité plus apparente que réelle ? La variabilité interannuelle des déficits est, en effet, très exagérée par rapport à celles des pluies et des débits qui sont à peu près les mêmes sur les deux bassins :

bassin	*rapport des pluies particulières extrêmes*	*rapport des débits particuliers extrêmes*	*rapport des déficits particuliers extrêmes*
Loire à Rieutord	2,28	2,28	5,7
Vernazon au Crouzet	2	2.30	3,1

Les influences se révèlent encore plus complexes sur le bassin du Chapeauroux où l'écart entre déficits extrêmes est le plus fort (*4,92*) après celui de la Loire à Rieutord. A l'influence de la couche neigeuse attendue à l'altitude moyenne de 1.205 mètres, très variable pourtant suivant les années (grandes fluctuations des précipitations particulières : rapport des extrêmes = 3,91) s'ajoute celle, déjà relevée à l'occasion des écoulements de crues, d'une couverture sableuse (arènes) plus épaisse sur de vastes parties planes et massives du bassin. Enfin, des possibilités de pertes définitives à travers le calcaire des petits causses de Montbel au profit du Lot ne sont pas non plus à exclure.

Autre cause de surprise : sur une même rivière, le Lignon du Velay, le rapport des déficits extrêmes est de 1,84 à l'amont (Chambon s/Lignon) et de 3,15 à la confluence avec la Loire (Pont-de-Lignon). Sur le fleuve, au contraire, à Rieutord, le rapport est beaucoup plus fort, 5,7, qu'à Bas-en-Basset, en aval, où il est de 2,4. Comment expliquer cela ?

Si les données avaient été parfaitement homogènes d'un bassin à l'autre quant à la période d'observation, les rapports entre extrêmes particuliers

des pluies, des débits et des déficits seraient probablement différents. Ainsi, la médiocrité des écarts entre déficits extrêmes, notamment sur la Seuge et le haut Lignon vellave, pourrait bien tenir à la brièveté de la période considérée (dix-sept et treize ans respectivement) pendant laquelle ne se sont peut-être pas rencontrées les conditions les plus excessives de pluviosité, de température et d'humidité de l'air. Cependant, pour des suites d'années aussi courtes, de quatorze à dix-sept ans, les rapports sont beaucoup plus élevés sur la Loire à Rieutord, le Chapeauroux, la Besbre, le haut Allier, le Lignon du Forez, le Vernazon, le Langouyrou et, à l'inverse, en quarante-cinq ans, les déficits de la Borne et de l'Ance du Nord, par exemple, en trente-quatre ans ceux de la Dunières, ont varié seulement de 1 à 1,99, 2,02 et 2,20. N'est-ce pas la preuve que les disparités climatiques, géomorphologiques, biogéographiques sont les véritables causes des différences constatées dans la variabilité des déficits particuliers d'un bassin à l'autre. Toutes choses étant égales pour chaque bassin, un allongement de la période sur laquelle porte l'analyse ne pourrait d'ailleurs qu'accroître les écarts entre déficits extrêmes.

2. *Causes du phénomène de la variabilité dans le bassin de la Loire*

Il s'agit moins sous ce titre d'identifier les grandes causes qui sont ici en jeu, hauteur de pluie, pluviosité saisonnière, température, évapotranspiration, que de déterminer le poids relatif de chacune d'elles dans la production du phénomène.

a) Variabilité interannuelle des précipitations

La variabilité interannuelle des précipitations n'explique pas seule l'irrégularité des déficits d'écoulement d'une année à l'autre. Elle n'est d'ailleurs pas considérable (5). Le rapport des pluies particulières extrêmes (tableau n° 79) n'excède pas 2,28 (Rieutord). Sur le bassin de la Loire avant Bas-en-Basset, il est de 1,74 en quarante-cinq ans alors que, pour une même durée, il est de 2,53, par exemple, sur le bassin de la Tamise à Teddington où les déficits ne varient cependant que de 1 à 2,23 (2,40 à Bas-en-Basset).

Exprimée d'une manière plus rigoureuse encore par le coefficient de variation ($\frac{\text{écart-type}}{\text{moyenne}}$) que par le rapport des valeurs extrêmes, cette variabilité pluviale n'est pas en corrélation étroite avec celle des déficits puisque, par exemple, pour les deux bassins de l'Ance du Nord et du Lignon vellave cités au tableau n° 81, les coefficients de variation des déficits sont de 0,175 et 0,276 alors que les pluies moyennes annuelles varient à peu près de la même manière dans les deux cas.

(5) cf. 1ère partie, chapitre II.

TABLEAU N° 81

COEFFICIENT DE VARIATION DES PLUIES, DES DEBITS ET DES DEFICITS ANNUELS PARTICULIERS SUR LES BASSINS DE LA BORNE A CHADRAC LA LOIRE A BAS-EN-BASSET LE LIGNON DU VELAY A PONT-DE-LIGNON L'ANCE DU NORD A LAPRAT

bassin	C.V. *pluie*	C.V. *débit*	C.V. *déficit*
Borne	0,135	0,283	0,131
Loire	0,135	0,330	0,173
Lignon du Velay	0,157	0,428	0,276
Ance du Nord	0,163	0,288	0,175

b) **Rôle de la répartition des pluies dans l'année**

Il est logique de penser que les caractères saisonniers de la pluviosité ont une part dans cette forte variabilité des déficits. Plus abondantes en saison chaude qu'en saison froide (6), les pluies sont, en outre, très inégales d'un été à l'autre. La valeur des déficits en est nécessairement affectée. Toutefois, cette influence n'est pas facile à mettre en évidence dans les bilans annuels comme le montre l'analyse menée à cette fin sur le bassin du Lignon du Velay à Pont-de-Lignon, l'un de ceux pourtant

— où le déficit annuel est le plus variable (rapport des valeurs extrêmes : 3,15),

— où les pluies sont le plus concentrées en fin de saison chaude,

— où la corrélation entre les précipitations et l'écoulement annuels est la plus étroite ($R = 0{,}93$) dans le cadre, cette fois pertinent, de l'année hydrologique qui commence le 1er octobre.

Les pluies de saison chaude (mai, juin, juillet, août et septembre) y varient davantage que les pluies annuelles : leur coefficient de variation ($C.V. = \frac{\text{écart-type}}{\text{moyenne}}$) est égal à 0,244 alors qu'il est de 0,185 pour les pluies de l'année. Sans doute n'est-il pas difficile de relever parmi les valeurs inscrites au tableau n° 82 des années comme 1950-1951, 1945-1946, 1952-1953, 1937-1938 pour lesquelles, aux gros déficits de

(6) En dix-neuf bassins-témoins sur vingt et un, la part des précipitations de la moitié « chaude » de l'année dépasse 50 % du total annuel : elle est de 57 % sur le bassin de la Loire en amont de Bas-en-Basset. Nulle part, les pluies du mois de juillet, le plus sec en moyenne, ne sont inférieures à 50 mm (cf. 1ère partie, chapitre III, tableau n° 17).

602 mm, 585 mm, 560 mm et 530 mm (la moyenne globale étant de 428 mm), correspond une forte pluviosité estivale et, au contraire, des années comme 1933-1934, 1928-1929, 1948-1949 où la faiblesse des précipitations de mai à octobre est accompagnée d'une réduction du déficit à des valeurs (167 mm, 338 mm, 380 mm) inférieures à la moyenne.

Toutefois, ces observations particulières ne sont pas du tout confirmées par les graphiques de corrélation entre précipitations estivales et déficits ou quotients d'écoulement annuels : aucune liaison significative n'y apparaît (figure 84 d et f). Paradoxalement, la corrélation est moins mauvaise entre précipitations hivernales et déficits ou quotients d'écoulement (figure 84 c et e), sans amélioration néanmoins appréciable par rapport aux graphiques (figure 84 a et b) fondés sur les valeurs annuelles (7).

c) **Influence déterminante de la température**

En l'absence de liaison entre déficits et pluies estivales ou annuelles, la variable essentielle qu'est la température prend un nouveau relief. Elle est extrêmement irrégulière en toutes saisons et les variations sont brutales en altitude (8). Comme l'évapotranspiration en dépend, l'irrégularité des déficits particuliers en est une conséquence indirecte.

Plus la température est élevée, plus le déficit devrait théoriquement s'accroître. Mais ce qui agit de fait sur le déficit est moins la seule température que la résultante atmosphérique de conditions thermiques et pluviales. Lors d'un été à la fois chaud et humide, le déficit sera plus élevé que pendant un été sec et également chaud ; à l'année chaude et sèche correspondra un déficit aussi faible qu'en année fraîche et humide. En montagne, ces phénomènes seront beaucoup plus diversifiés qu'en plaine car une augmentation de la pluviosité, donc de la nébulosité, détermine souvent une chute de la température.

Malheureusement, les observations thermométriques toujours délicates en montagne et, pour cette raison, tard venues, rares et discontinues dans la région, interdisent toute finesse dans l'analyse des corrélations entre déficits et températures. Seules les données précises des deux stations officielles établies à Clermont-Ferrand et à Chadrac-Le Puy ont pu être utilisées pour quelques sondages dont les résultats ne sont pas sans intérêt.

La Météorologie Nationale a calculé depuis 1949, en ces deux stations,

(7) Il est à noter, incidemment, que les quotients d'écoulement annuels ou hivernaux sont de toutes manières plus expressifs sur ce bassin que les déficits.

(8) P. ESTIENNE et P. PAUL ont bien montré l'extrême variabilité de la température, en toutes saisons, sur les hautes terres du Massif Central intérieur et méridional. L'amplitude moyenne annuelle est à peu près aussi forte au fond du bassin du Puy, par exemple (16°5 au Puy à 715 mètres d'altitude) et en altitude (16°3 au Cros de Géorand à 1.000 mètres et 16° à Issanlas à 1.200 mètres). L'amplitude diurne est forte également : même l'été, le gel est un phénomène fréquent dans les vallées élevées.

comme en trente-six autres réparties sur le territoire français ([9]) des bilans hydriques décadaires théoriques fondés sur les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (selon la méthode de PENMAN) et les hauteurs de précipitations réellement mesurées. Ces bilans des valeurs mensuelles E T P - P de 1949 à 1967 sont groupés dans le tableau n° 83. Le tableau n° 84 relatif à la seule station du Puy représente, à côté des bilans mensuels des dix-neuf années, les évapotranspirations potentielles calculées suivant la méthode de PENMAN et la méthode de L. TURC ([10]).

Faute d'observations en d'autres stations, les données ponctuelles au Puy sont considérées comme reflétant en gros les conditions pluviothermiques régionales annuelles et elles ont été mises successivement en corrélation avec les mesures hydrologiques (déficit - écoulement - quotient d'écoulement) se rapportant aux bassins de la Loire à Bas-en-Basset (3.300 km^2) et de la Borne à Chadrac (430 km^2) dont les pentes convergent à peu près vers Le Puy. Les figures 85 et 86 expriment graphiquement les résultats obtenus. Pour chaque bassin, les données de l'écoulement ont été mises en parallèle

1) avec les valeurs isolées de l'évapotranspiration potentielle qui donnent une image sans doute élaborée mais fidèle de la température,

2) avec le bilan potentiel E T P - P pendant les huit mois d'avril à décembre et non pendant l'année entière. En effet, les bilans décadaires ont souvent été si incertains pendant les mois de décembre, janvier, février et mars qu'ils ont été exclus par prudence des totaux annuels. Ainsi, la série établie sur les huit mois susdits fournit des données plus comparables d'une année à l'autre. Et, d'ailleurs, en plein hiver, l'évapotranspiration potentielle, surtout en montagne, est si faible que les bilans E T P - P calculés sur huit mois peuvent être comparés, sans grand dommage pour les corrélations, aux déficits annuels.

Ces différents graphiques mettent d'abord en évidence que l'évapo-

([9]) Ces données ont permis l'établissement par la Météorologie Nationale des cartes de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle et des cartes de bilans potentiels. Les autres stations les plus proches en dehors du bassin de la Loire supérieure sont celles de Limoges, Millau, Lyon, Dijon, Orléans.

([10]) Sur les principes de ces méthodes et le calcul pratique des valeurs, cf. P. BROCHET et N. GERBIER (1968).

La méthode de PENMAN aboutit, en moyenne, à des valeurs légèrement supérieures à celles obtenues par la méthode de L. TURC. Ce dernier auteur tient compte de la température et de la durée moyenne d'insolation. La formule de PENMAN est beaucoup plus complexe et rigoureuse en théorie puisqu'elle se base sur le bilan d'énergie. Mais PENMAN a bien expliqué lui-même qu'il surestime l'ETP au printemps et la sousestime à l'automne en ne tenant pas compte de l'inertie thermique du sol. Or, au printemps, le sol doit être relativement plus froid qu'en automne, ceci étant particulièrement vrai dans les hautes régions du bassin de la Loire où la froidure du printemps et la vigueur de l'été sont habituelles (les gelées sont, en moyenne, très tardives).

transpiration potentielle ou le bilan potentiel sont, dans l'ensemble, en meilleure corrélation avec l'écoulement et le coefficient d'écoulement qu'avec les déficits.

Un second fait se dégage nettement. Ecoulements et déficits dépendent plus étroitement des effets combinés des deux facteurs température et pluie (représentés par l'indice E T P - P) que de la seule température qui entre, à titre principal, dans le calcul de l'E T P.

Or ce facteur décisif (E T P - P) est éminemment variable. Son coefficient de variation ($\frac{\text{écart-type}}{\text{moyenne}}$) est de 0,69 à la station du Puy, donc bien supérieur à ceux de la pluie moyenne annuelle (0,13 sur les deux bassins et 0,15 à la seule station du Puy) ou de la pluie de saison chaude, comme le laisse voir le sondage dans le bassin du Lignon.

A la station de Clermont-Ferrand, à 330 mètres d'altitude, soit près de 400 mètres plus bas qu'au Puy, les mêmes bilans hydriques théoriques de chaque année (E T P - P pour huit mois), pendant la même période d'observation de 1940-1967, ont été moins irréguliers : leur coefficient de variation est de 0,41 au lieu de 0,69 au Puy. Le fait suggère que la variabilité des combinaisons entre E T P et P s'accroît avec l'altitude parce que les contrastes thermiques y sont plus fréquents et plus accusés. Si les précipitations estivales sont assez abondantes pour fournir à l'évaporation et aux plantes l'eau qu'elles requièrent quand la température s'élève, des bassins aussi élevés que ceux de la Loire à Rieutord, de la Gazeille, de l'Ance du Nord, de la Dunières (aux altitudes moyennes respectives de 1.290 mètres, 1.207 mètres, 1.025 mètres, 920 mètres) peuvent avoir des déficits particuliers de 684 mm, 659 mm, 660 mm, 693 mm.

Finalement, la conjugaison mouvante des températures et des pluies mensuelles et saisonnières engendre à sa ressemblance l'inégalité généralement forte des déficits d'une année à l'autre dans tous les petits bassins montagnards ligériens.

Aux compositions fondamentales de la température et de la pluie, s'ajoutent tous les harmoniques, toutes les infinies variations des particularités physiques locales : la topographie, l'épaisseur et la nature de la couche d'altérite, la densité du couvert végétal, l'intensité et la fréquence des averses, les micro-climats propres à chaque bassin. Ce sont eux qui créent les fortes disparités d'un lieu à l'autre dans la variabilité interannuelle des déficits : ainsi des deux Lignon du Velay et du Forez, par exemple, où les rapports des déficits particuliers extrêmes ont été respectivement, pour la même période, 1,84 et 3,58. La petite taille des bassins favorise ces contrastes puisque tel ou tel facteur particulier peut prévaloir dans chacun d'eux sans que les influences contraires se compensent comme il arrive fréquemment dans les grands bassins forcément beaucoup plus hétérogènes.

B. Bilans globaux

L'établissement, en trente bassins ligériens, des bilans globaux de l'écoulement répond au souci de découvrir, à l'échelle régionale, des rapports d'une certaine fixité entre les différents termes du bilan hydrologique. Les principaux résultats sont recensés au tableau n° 85 où sont aussi portées, à côté des valeurs globales de la pluie, de l'écoulement, du déficit, du quotient d'écoulement, les périodes d'observation sur chaque bassin ainsi que les superficies et les altitudes moyennes. Y figurent enfin des chiffres de températures moyennes annuelles à considérer comme indiquant plutôt un ordre de grandeur que les résultats absolus d'enregistrement précis. Ils ont été, en effet, calculés à partir des rares « normales » disponibles, grâce aux connaissances générales sur le tracé des isothermes et sur les valeurs du gradient vertical de température en diverses régions du Massif Central (11). La moyenne a été obtenue pour chaque surface réceptrice en pondérant les valeurs théoriques de ce barême en fonction des surfaces comprises dans différentes tranches d'altitude.

1. *Quelques valeurs repères*

— Les chiffres de déficits s'échelonnent entre 335 mm pour le bassin du Vernazon au Crouzet, sur la crête vivaraise sud-orientale, et 570 mm pour celui de la Coise à Moulin-Brûlé dans les monts du Lyonnais. Il sied d'en rapprocher les « valeurs-limites » des déficits particuliers qui, nulle part, n'ont été supérieurs à 700 mm ni inférieurs à 120 mm.

— L'échelle des précipitations annuelles globales est plus étendue : 1.625 mm au maximum sur le bassin de la Loire à Rieutord et, à l'autre extrémité, respectivement 767 mm, 768 mm et 780 mm pour les trois bassins de la Borne, de la Sénouire et du Chapeauroux.

— Les écoulements moyens globaux sont encore plus variés d'un bassin à l'autre : la lame d'eau écoulée en moyenne par an à Chadrac (Borne) est de 278 mm et de 1.248 mm à Rieutord (Loire).

— Enfin, les quotients d'écoulement sont compris entre les valeurs globales extrêmes de 0,78, 0,77 sur les bassins voisins du Vernazon puis de la Loire à Rieutord, et 0,34, 0,36, 0,36 pour la Coise, la Borne, l'Arroux. Ces chiffres confirment derechef que les quotients d'écoulement varient plus que les déficits d'un bassin à l'autre à l'intérieur d'une même région : ici, de 1 à 2,3 alors que le rapport entre déficits globaux extrêmes est de 1,7 seulement.

---

(11) Ainsi, le gradient adopté dans le Velay a été sensiblement plus fort (0°59 par 100 mètres) que dans la partie nord du bassin (0°45 par 100 mètres) près du Morvan. cf. P. ESTIENNE (1956) - R. BALSEINTE (1966) - P. PAUL (1969).

2. *Influences sur les déficits annuels globaux des précipitations moyennes et des températures*

A première vue, le graphique de la figure 87 ne fait guère apparaître de corrélation entre totaux pluviométriques annuels et déficits globaux. Et si, à l'examen, une tendance peut y être décelée, ce n'est pas celle de déficits croissant avec la hauteur des pluies annuelles mais plutôt l'inverse : un léger affaiblissement des pertes se laisse discerner pour les plus fortes précipitations, le phénomène étant sensible dans la partie droite du graphique c'est-à-dire au-dessus de 1.000 mm de pluie moyenne annuelle. Rien là que de naturel : les chutes pluviales augmentent en général avec l'altitude tandis que diminuent la température moyenne et, corrélativement, l'évaporation de l'atmosphère et des plantes. Dans les bassins où la tranche d'eau précipitée est suffisante pour alimenter l'évapotranspiration potentielle, le facteur décisif est la température ; une surabondance de précipitations ne peut profiter qu'au ruissellement quand l'évapotranspiration a atteint sa valeur maximale. Or, des trente bassins dont s'agit, dix-sept ont une altitude moyenne supérieure à 1.000 mètres. Les pertes corrélatives aux pluviosités y atteignent leur maximum que met bien en évidence, sur la figure 87, l'horizontalité de la bande parallèle à l'axe des abcisses (entre 335 mm et 570 mm d'ordonnées) dans laquelle se groupent les points afférents aux différents bassins. Il est même possible, dans le nuage des points du graphique, de déceler, en relation avec l'altitude, certains paliers pour les déficits extrêmes.

En aucun bassin, au-dessus de 1.200 mètres d'altitude moyenne, le déficit global n'a dépassé celui (peut-être légèrement exagéré) du haut Chapeauroux : 473 mm en amont de Auroux (211 km² de bassin versant à 1.236 mètres d'altitude moyenne) ([12]). Sur les deux petits bassins les plus élevés, celui du Grandrieu (73 km² et 1.308 mètres d'altitude moyenne) et celui de la Loire à Rieutord (62 km² et 1.290 mètres d'altitude moyenne), le déficit global est exactement le même (378 mm et 377 mm pour des tranches pluviales moyennes très différentes : 840 mm sur le bassin du Grandrieu et 1.625 mm sur celui de la Loire. Pour les dix bassins (numéros 8 à 18 portés sur les figures) dont l'altitude moyenne est comprise entre 1.000 et 1.200 mètres, les déficits globaux les plus forts ont été 535 mm et 514 mm sur le haut Alagnon en amont

([12]) Faut-il voir dans cette valeur très forte une confirmation de l'hypothèse, déjà faite à l'occasion des déficits particuliers, suivant laquelle une partie des eaux précipitées sur le haut bassin du Chapeauroux seraient détournées par une circulation karstique vers le bassin du Lot ? En effet, sur le même bassin du Chapeauroux, le déficit global en amont d'Auroux est de 473 mm pour 922 mm de pluies, nettement plus fort que sur le Grandrieu voisin, petit affluent du Chapeauroux, où il est de 378 mm (pour 840 mm de pluies) et que sur le grand bassin du Chapeauroux lui-même (389 km²) où il est de 430 mm seulement mais où le déficit pourrait être limité par une faible pluviosité annuelle (780 mm).

de Joursac, et la Couze de Saint-Floret, dont on peut penser qu'ils reçoivent assez de pluie (1.170 mm et 1.160 mm) en toutes saisons pour que l'évapotranspiration potentielle soit, en moyenne, à peu près satisfaite.

Il est vraisemblable, au contraire, que les déficits les plus forts, relevés sur les bassins moins élevés de

la Coise : 570 mm, altitude moyenne : 700 m,
la Sioule : 560 mm, altitude moyenne : 790 m,
l'Arroux : 547 mm, altitude moyenne : 410 m,
la Dore : 546 mm, altitude moyenne : 860 m,

n'atteignent pas le plafond régional parce que ces bassins ne sont pas très arrosés : les pluies moyennes globales qui y sont respectivement de 860 mm, 990 mm, 855 mm et 930 mm y sont peut-être un facteur limitatif du déficit, surtout dans le cas de la Coise qui, pour une petite surface réceptrice de 176 km², a aussi le quotient d'écoulement le plus faible (0,36) de toutes les rivières ligériennes.

De fait, la forte dispersion des points sur le graphique de corrélation entre pluies et déficits globaux est à l'image des nombreuses disparités de taille, d'altitude et de pluviosité qui caractérisent chacun des trente bassins. Aucune relation, par exemple, n'apparaît entre précipitations annuelles et altitude moyenne (figure 88) car l'influence de l'altitude sur les précipitations est dissimulée, voire contrariée, par celle de l'exposition aux vents pluvieux. Le petit bassin du Grandrieu, le plus élevé de tous (1.308 mètres d'altitude moyenne) reçoit annuellement un peu moins de pluie (840 mm) que le bassin de l'Arroux (855 mm) qui se développe sur 3.300 km² à 410 mètres d'altitude moyenne. Sur ce même dernier bassin, exactement de la même taille que celui de la Loire en amont de Bas-en-Basset, il tombe à peine moins d'eau (855 mm) chaque année que sur le haut bassin montagneux du fleuve (890 mm pour la même période).

Bien que la corrélation soit meilleure entre températures moyennes annuelles et déficits globaux qu'entre ceux-ci et pluies annuelles, de forts écarts sur le diagramme de dispersion se manifestent de part et d'autre de la droite de régression qui a été calculée et dessinée (figure 90). Certes, sous une même température, les déficits globaux sont de 385 mm et 390 mm sur les bassins exactement égaux (115 km²) du Lignon du Forez et de la Seuge dont l'un reçoit en moyenne 1170 mm de pluie annuelle et le second 855 seulement. Mais, pour une température moyenne à peu près équivalente à celle des précédents bassins (6°9 au lieu de 6°7), les bassins un peu plus étendus de l'Alagnon (321 km² ou de la Couze Pavin (219 km²) ont des déficits supérieurs de 125 ou 150 mm. Les pluies annuelles y sont pourtant de la même hauteur moyenne (1170 et 1160 mm) que sur le Lignon forézien (1170 mm). Dans ces conditions très diverses, la droite d'ajustement des déficits en fonction

de la température ne peut avoir qu'une valeur indicative. Elle fait apparaître une variation du déficit de 40 à 45 mm par degré centigrade de température moyenne annuelle, valeur quelque peu supérieure à celle que retient M. PARDE (1964 a) pour les plaines d'Europe (20 à 30 mm). Il semble même, d'après les faits observés et aussi à vue d'œil sur le diagramme de dispersion, que cette diminution du déficit avec l'altitude est plus rapide au-dessus de 1.000 mètres (à peu près 7°4 en abcisses sur le diagramme) qu'elle ne l'est en deçà. En d'autres termes, le meilleur ajustement ne serait pas une droite unique mais une ligne brisée ou une courbe qui ferait succéder les uns aux autres des secteurs de pente de moins en moins forte à mesure qu'augmenterait la température moyenne ou que diminuerait l'altitude. C'est, du moins, l'hypothèse à laquelle peut conduire l'examen des déficits sur les petits bassins ligériens. Il reste toutefois à vérifier que c'est bien l'altitude et seulement la diminution corrélative de la température qui sont à l'origine de cette décroissance accélérée des déficits quand on s'élève. L'accentuation générale des pentes dans les régions les plus élevées et l'exiguïté des bassins peut aussi favoriser un ruissellement plus rapide et, en conséquence, réduire les effets de l'évaporation.

La référence à des relations beaucoup plus générales établies entre précipitations, températures moyennes et déficits peut aider à saisir les influences probables des divers facteurs dans ces petits bassins dont les bilans sont tout de même connus avec assez d'exactitude.

3. *Référence aux évaluations de* WUNDT

Le barême établi par l'hydrologue allemand WUNDT, légèrement rectifié par A. COUTAGNE, est devenu le plus classique pour l'évaluation de l'écoulement et des pertes en fonction des températures moyennes et des pluies. Sur l'abaque de la figure 91 qui en est le meilleur résumé, les résultats relatifs aux trente bassins ligériens ont été portés sous deux formes : des points et des croix. Les premiers correspondent aux valeurs déduites des précipitations et des températures annuelles. Les croix représentent, par référence aussi aux hauteurs pluviales, les valeurs des déficits *réellement* observés, abstraction faite des températures. Pour la moitié des bassins, presque tous les plus élevés, les plus petits et les plus arrosés, il n'y a pas juxtaposition des points et des croix. Non seulement l'intervalle de variation des déficits globaux se révèle plus étendu en réalité (335 mm - 570 mm) que suivant le schéma de WUNDT (425 mm - 550 mm) mais les déficits réellement mesurés sont, en moyenne, plus faibles, de 80 à 100 mm, que ne le laisseraient supposer les températures moyennes. Sur trois bassins seulement, celui de la Coise et, à un moindre degré, ceux de la Borne et de l'Arroux, les déficits mesurés sont un peu plus élevés que les valeurs calculées d'après la température moyenne annuelle. L'explication en est simple : sur trois

bassins « continentaux », la moyenne annuelle des températures masque la réalité de températures d'été plutôt élevées qui coïncident avec des chutes d'eau de saison chaude relativement abondantes.

Sauf ces corrections, surtout applicables aux petits bassins d'altitude, le tableau de WUNDT est un bon moyen d'évaluation pour les plus grands bassins. Ainsi, pour ceux de la Loire en amont de Bas-en-Basset (3.300 km²), de l'Allier à Vieille-Brioude (2.260 km²), de la Sioule à Pont-du-Bouchet (1170 km²), les écarts par défaut, dus à l'altitude, et par excès, dus à la continentalité, se compensent harmonieusement dans des déficits globaux qui prennent exactement la place prévue sur l'abaque de WUNDT.

4. *Formules de* L. TURC *pour l'évaluation du déficit*

Parmi les formules géographiques expérimentales relatives aux bilans annuels, celle de L. TURC a donné jusqu'ici, semble-t-il, les meilleures approximations pour de nombreux bassins sous toutes sortes de climats (L. TURC, 1953). Les précipitations annuelles globales et la température moyenne annuelle étant connues, le déficit en résulte suivant l'équation :

$$\text{Déficit ou E (Turc)} = \frac{P}{\sqrt{0{,}9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

dans laquelle le paramètre L (où figure la température moyenne annuelle T°) est la limite vers laquelle tend l'évapotranspiration réelle, donc le déficit global, quand le bassin est largement approvisionné en eau. Partant de valeurs connues de l'évapotranspiration en 254 bassins de diverses régions du monde, l'auteur a pu établir empiriquement la relation suivante : $L = 300 + 25\ T° + 0{,}05\ T°^3$.

Le tableau n° 86 et les figures 92 et 93 rassemblent les résultats que donne la formule appliquée aux trente bassins ligériens et, pour comparaison, les valeurs de déficit et d'écoulement réellement mesurées.

En valeur absolue, les écarts entre chiffres calculés et mesurés atteignent au maximum 112 mm mais, sur la moitié des bassins, ils n'excèdent pas 50 mm. Dans 93 % des cas (vingt-huit bassins sur trente), la différence représente moins de 20 % du débit mesuré et, en dix-neuf bassins (près des deux tiers), elle est moindre que le dixième du débit. L'approximation est donc, dans l'ensemble, d'autant plus satisfaisante que des incertitudes pèsent dès l'abord sur les indices pluviométriques, hydrométriques, thermiques surtout. L'écart relatif de 35 % entre les écoulements mesurés et calculés est exceptionnellement fort sur le seul bassin de la Coise à Moulin-Brûlé.

Appliquée à la moyenne des trente bilans et donc en fonction de $P = 996$ mm, $P' = 534$ mm et $T° = 7°4$, la formule de L. TURC se révèle plus adéquate encore à son objet : l'écart entre les déficits

mesuré et calculé est de 9 mm seulement, du même ordre exactement que celui qu'a découvert L. TURC lui-même pour les affluents de la Loire moyenne et inférieure [13]. Cependant, ce bilan moyen ne constitue évidemment pas un vrai bilan régional puisqu'il inclut, à parts égales, des bassins de superficies et de caractères très différents. Les bassins les plus vastes, ceux de la Loire à Bas-en-Basset (3.300 km²), de l'Arroux (3.300 km²), de l'Allier à Vieille-Brioude (2.260 km²) et même de la Sioule à Pont-du-Bouchet (1170 km²) sont, à ce titre, beaucoup plus représentatifs de la réalité moyenne régionale. Or, sur ces quatre bassins, les écarts portent respectivement sur 35 mm, 30 mm, 61 mm et 70 mm, valeurs qui, en soi, ne sont pas excessives mais qui font mesurer la dispersion des résultats rivière par rivière.

Pour dix d'entre elles dont la Loire et l'Allier à leur origine, les déficits calculés sont plus faibles que les déficits mesurés (Loire à Rieutord = − 72 mm, Vernazon au Crouzet = − 112 mm, Allier à Lavalette = − 82 mm et Langouyrou à Langogne = − 58 mm). Le haut Lignon du Forez (− 65 mm), l'Aix supérieur (− 43 mm), la Seuge (− 36 mm) sont aussi dans ce cas. Le fait n'a pas lieu de surprendre parce que la formule de L. TURC a été établie sur des bassins beaucoup plus étendus, moins accidentés, en général aussi moins élevés que ceux-ci et où les prélèvements de l'évapotranspiration ont, par conséquent, toutes chances d'être relativement plus forts à température moyenne annuelle égale. En outre, sur ces hauts bassins de la Loire supérieure, le maximum pluviométrique se produit soit à la fin de l'automne soit en hiver ou au début du printemps [14], saisons habituellement froides au-dessus de 1.100 et 1.200 mètres. Au contraire, et en faisant abstraction des dix rivières pour lesquelles les écarts, inférieurs à 30 mm dans un sens ou dans l'autre, n'ont guère de signification, la majorité des bassins ligériens ont en réalité des déficits plus élevés que les valeurs correspondantes établies par la formule de L. TURC. Ce sont tous des bassins où les précipitations estivales sont abondantes en valeur relative ou en valeur absolue : l'évaporation observée y est naturellement supérieure à l'évaporation calculée. Le graphique n° 92 où sont comparés les déficits calculés et les déficits mesurés rend compte de ces particularités régionales et suggère, en raison de l'orientation générale du nuage de points, qu'une légère modification de la relation $L = f(T°)$ pourrait améliorer les résultats dans le domaine considéré. En effet, les valeurs de

---

[13] L'écart entre valeurs calculées et mesurées est de 5 mm sur l'ensemble des bassins de la Besbre, du Cher, de la Vienne, de la Creuse, du Loir, de la Mayenne, de la Sarthe et de la Maine (L. TURC, 1953).

[14] Les indices de concentration des pluies sont, par exemple, o n D sur le bassin de la Loire à Rieutord, n D j sur le haut Lignon du Forez, a m J sur le bassin de la Seuge. L. TURC avait trouvé des écarts dans le même sens en Algérie où dominent les précipitations de saison froide (L. TURC, 1954).

$L = 300 + 25\ T° + 0{,}05\ T°^3$ (valeur de l'évapotranspiration maximale à température constante) sont sensiblement différentes de celles qui sont portées au tableau n° 86 et qui résultent, pour chaque bilan, des données observées ([15]). Toutefois, l'établissement d'une nouvelle courbe moyenne de L (T°) pour l'ensemble des bassins étudiés ne serait-il pas raffinement illusoire dans une évaluation qui restera toujours approximative à l'échelle de chaque petit bassin où pluie, débit et température sont eux-mêmes très variables et plus ou moins fidèlement observés ?

Dès lors que sont bien identifiés le sens des écarts et leur cause générale, à savoir la concentration des précipitations pendant la saison chaude, il apparaît plus opportun de tester une autre formule de L. TURC (1963) et le degré d'amélioration qu'elle apporte dans l'estimation des termes du bilan annuel.

Cette seconde méthode tient compte, en effet, de la répartition des précipitations et des températures au cours de l'année puisqu'elle se fonde sur le calcul, mois par mois, de l'évapotranspiration potentielle, la somme de ces douze indices mensuels constituant l'indice annuel. La méthode a aussi l'avantage d'introduire, en plus de la température moyenne mensuelle sous abri (t°), la radiation globale moyenne (Ig) qui est évidemment un facteur important de l'évapotranspiration([16]). Ainsi, pour chaque mois, les évapotranspirations potentielles (ETP) et réelles (ETR) sont ainsi calculées :

$$ETP = 0{,}40\ \frac{t°}{t° + 15}\ (Ig + 50)\ ([17])$$

et ETR = la plus petite des valeurs : 0,95 ETP ou $\frac{P + 100 - \triangle}{2}$

$\triangle$ représentant le déficit du sol en eau évaporable au début du mois.

([15]) Grâce à la formule générale :

$$\text{Déficit ou E (Turc)} = \frac{P}{\sqrt{0{,}9 + \frac{P^2}{L^2}}},$$

il est possible de calculer la valeur L quand pluies et déficits sont connus :

$$L = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{E^2} - \frac{0{,}9}{P^2}}}$$

Les graphiques 94 et 95 se rapportent à ce calcul de L et à la comparaison entre valeurs de L établies selon les deux méthodes.

([16]) Ig est évalué à partir de la durée réelle d'insolation (h), de la durée maximale d'insolation possible (H) et de la radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère (Iga) qui dépend à la fois de la latitude et de la période de l'année. La formule en est :

$$Ig = (0{,}18 + 0{,}62\ \frac{h}{H})\ Iga.$$

([17]) En raison de l'inégalité des mois, il convient de remplacer, en février, le coefficient 0,40 par 0,37.

La vérification tentée sur le bassin de la Loire à Bas-en-Basset n'est autre qu'un sondage indicatif dans lequel les données météorologiques de base sont celles de la station du Puy (45°03 de latitude nord, à peu près au centre du bassin) pour laquelle sont connues les valeurs globales de la durée réelle d'insolation (h) et de t° durant la période de 1931 à 1960. Un gradient de 0°60 par 100 mètres a été appliqué pour tenir compte de l'altitude moyenne du bassin (965 mètres au lieu de 714 mètres au Puy). Enfin, par souci de garantie supplémentaire, ont été seuls retenus les débits et les précipitations globaux de la période 1931-1960, qui diffèrent légèrement des valeurs relatives à un plus grand nombre d'années (cinquante) portées au tableau n° 85.

Il convient d'abord de rappeler que, avec la première formule de L. TURC (1951), les déficits calculés et mesurés prennent les valeurs suivantes :

Période	*P (en mm)*	*P' (en mm)*	*Déficit mesuré (en mm) (1)*	*Déficit calculé (en mm) (2)*	*(1) - (2)*
1919-1968	876	392	484	449	+35
1931-1960	900	385	515	452	+63 [18]

En appliquant la seconde formule, la somme des évapotranspirations réelles mensuelles est de 526 mm pour la période 1931-1960). Le déficit calculé est donc un peu plus fort cette fois-ci que le déficit mesuré, 515 mm. Mais la différence négligeable entre 526 et 515, soit 11 mm, démontre que la seconde formule est un outil plus aigu encore que la première, au moins quand il s'agit d'utiliser sur un bassin de 3.300 km² les données météorologiques disponibles en une seule station-témoin [19].

Cependant, à condition que la répartition des pluies dans l'année soit prise en considération, le recours aux formules empiriques générales se révèle utile à la connaissance et au contrôle des différentes formes du bilan hydrologique. Telle est la principale conclusion de portée générale qui se dégage de l'analyse des bilans globaux.

---

[18] Il est à noter que l'écart est beaucoup plus fort pour cette période alors que le déficit calculé est pratiquement le même.

[19] Les données relatives à la durée moyenne d'insolation au cours de la même période qu'au Puy, 1931-1960, ont été publiées pour le poste de Clermont-Ferrand seulement (GARNIER, 1967). Pour 1946-1960, les postes sont plus nombreux : Château-Chinon et Mont Saint-Vincent à la lisière du bassin, Vichy et Nevers, en plus des deux stations précédentes de Clermont-Ferrand et le Puy.

Une seconde conclusion, moins rassurante, se rapporte à l'influence propre de l'altitude dans les petits bassins montagneux (plus de 1.000 mètres), laquelle est certainement des plus difficiles à discerner. Il a pu sembler, en effet, que les déficits globaux, en moyenne, y diminueraient plus rapidement avec l'altitude que ne le laissent prévoir l'abaque de WUNDT ou la première formule de L. TURC, par référence à la seule température moyenne annuelle. Mais l'altitude est-elle seule à rendre compte en l'espèce du retard pris par le calcul sur le réel ? L'exiguïté des bassins ne s'y ajoute-t-elle pas comme une autre cause de même sens ? La prédominance des pluies de saison froide ne vient-elle pas en renfort des deux autres ? A ce point, l'analyste, faute de données disponibles, ne peut plus que faire l'inventaire vraisemblable des possibles. Il faudrait, au moins, une meilleure connaissance des conditions thermiques pour commencer de répondre à la question posée.

Enfin, dernière conclusion à propos des bilans : dans tous les petits bassins étudiés, les inégalités des déficits globaux, ajoutées à la grande variabilité des déficits particuliers, montrent la quasi impossibilité, à cette échelle et dans un ensemble hétérogène, de fonder sur un terme aussi instable une évaluation des écoulements. Les quotients d'écoulement, eux aussi variables d'un bassin à l'autre, sont apparus finalement plus révélateurs des disparités géographiques locales. Dans une province hydrologique où les corrélations sont étroites, ils restent d'une grande valeur explicative ([20]).

([20]) Une réflexion analogue ressort de l'étude sur les déficits d'écoulement annuels en pays tropicaux faite par J. RODIER et M. ROCHE (1954).

CHAPITRE III

LES RESSOURCES HYDRIQUES NATURELLES EN AMONT DE GIEN

En rigueur, les bilans globaux de l'écoulement sur un bassin tendent vers l'exactitude aux trois conditions suivantes :

— multiplicité et qualité des données hydrologiques et pluviométriques,

— correspondance des périodes pour lesquelles les indices de pluies et de débits sont assurés,

— enfin, coïncidence entre bassins hydrographique (cadre du ruissellement de surface) et hydrogéologique (domaine de l'écoulement souterrain) de sorte que des pertes ou des gains au profit ou aux dépens de bassins voisins ne faussent pas la comparaison entre l'alimentation pluviale et le débit à l'exutoire d'une même partie de l'espace.

Dans le bassin de la Loire supérieure, bien que l'infidélité des conditions réelles à leur modèle idéal soit relativement limitée, elle n'en est pas moins cause d'assez graves incertitudes. Ainsi, les spécialistes des jaugeages ne peuvent garantir l'exactitude des débits à Gien pour la période antérieure à 1936 malgré une sûre et longue connaissance des hauteurs d'eau à l'échelle de cette station. Car l'évaluation des débits anciens peut seulement utiliser le barême des correspondances hauteurs/débits (courbe de tarage) résultant de jaugeages postérieurs, ce qui devient une assimilation hasardeuse dans le cas d'un lit fluvial aussi peu stable qu'il l'est à Gien. Les chiffres de débits aux stations d'amont les plus proches, Nevers (Loire) et le Guétin (Allier) sont encore beaucoup plus précaires.

Dans ces conditions, la comparaison des valeurs globales de l'écoulement à celles des précipitations n'est pas aisée. Elle est d'autant plus aléatoire que les variabilités interannuelles des modules et des débits moyens mensuels se sont révélées particulièrement fortes à Gien.

Quant à la dernière des conditions, deux parties du bassin doivent retenir l'attention. Certains cas de mauvaises corrélations entre les débits au Bec d'Allier, d'une part, et ceux de Gien, d'autre part, conduisent à penser que la possibilité de pertes souterraines dans le lit de la Loire, même en amont de Gien, ne serait peut-être pas à exclure. Puis, tout au sud, à l'extrémité de la Margeride, les détournements souterrains

semblent expliquer en partie la maigreur des débits relevés sur le Chapeauroux.

Les analyses précédentes sur les comportements hydrologiques dans le reste du bassin serviront à dégager pourquoi et dans quelle mesure les bilans peuvent être faussés et renseigneront par conséquent sur l'ordre d'approximation à reconnaître au tableau général des bilans à Gien.

I. LA QUESTION DES « PERTES » SOUTERRAINES D'UNE PARTIE DES EAUX DE LA LOIRE

A. Part de la géologie dans les « anomalies » de l'écoulement du Chapeauroux

Les dépôts jurassiques qui masquent la terminaison sud-orientale du plateau granitique de la Margeride sont le siège d'une circulation karstique (J. RIVOIRE et C. ROUSSET, 1968). Il est donc a priori possible que les ruisseaux de Beyrac, d'Allenc, tributaires du Lot, et le Chassezac, tributaire de l'Ardèche, draînent une partie des eaux précipitées sur le haut bassin de la Boutaresse, petit affluent du Chapeauroux (figure 96). La plongée générale vers le sud-ouest de la surface fracturée du granit sous les dépôts secondaires, très visible sur les coupes géologiques à travers la plaine de Montbel, et les forts débits d'étiage (150 à 200 l/s) de la Gourge, à l'est-nord-est d'Allenc, la plus abondante et la seule pérenne des résurgences, prouvent qu'il en est bien ainsi.

En dépit de certains détails trompeurs de la topographie, il n'existe pas de draînage permanent de la plaine de Montbel vers le ruisseau d'Arribal, sous-affluent de l'Allier. Le réseau hydrographique superficiel comprend, d'une part, les petits cours d'eau formés sur le granit et qui se dirigent du nord au sud vers la partie la plus déprimée de la plaine de Montbel (1) et, d'autre part, les ruisseaux issus des pentes marneuses qui constituent le soubassement nord du Causse de Belvezet. Ces talwegs se terminent par des entonnoirs absorbants, au nombre d'une vingtaine, les « crozes », dispersés en deux séries principales correspondant l'une aux ruisseaux venus du nord, l'autre à ceux du sud. Dans le prolongement de ces ruisseaux saisonniers, la plaine est traversée de légères dépressions évoquant des vallées, larges d'une centaine de mètres et qui dessinent un réseau dirigé vers les Ponceaux du Devès, zone des sources du ru d'Arribal. Il s'agit d'anciens lits torrentiels de la fin de l'époque würmienne où, par dessus le pergélisol karstique, les eaux, lors des débâcles, ruisselaient vers l'Arribal à partir des hauteurs qui constituent

(1) cf. isohypse de 1.210 m sur le croquis (figure 96).

aujourd'hui encore la ligne apparente de partage des eaux. Actuellement, à la fin des rudes hivers ou après les violents orages durant lesquels le ruissellement l'emporte sur l'infiltration, les eaux s'accumulent dans ces larges couloirs dont le sol, par endroits, s'est imperméabilisé. Mais il ne semble pas possible qu'elles franchissent les bosses gazonnées qui, d'environ cinquante centimètres de haut, aux Ponceaux de Devès, séparent le réseau de draînage superficiel de Montbel et celui d'Arribal. Quand l'infiltration est ralentie, c'est l'évaporation et non l'écoulement vers l'Allier qui agit sur les eaux stagnantes.

Au total, pour ces 25 km², la perte peut être évaluée, en moyenne annuelle, à 400 litres par seconde, soit à peu près 10 % du module du Chapeauroux à Chapeauroux. Sur ce bassin, elle accroît de 30 mm environ le déficit annuel global apparent. Il reste qu'elle est négligeable à l'échelle de tout l'immense bassin considéré ici.

B. Particularités hydrogéologiques du bassin de la Loire entre le Bec d'Allier et Gien

Le phénomène des pertes et résurgences de la Loire moyenne, dont les mécanismes, d'ailleurs, ont été reconnus au cours de la dernière décennie, est patent à l'aval de Gien (²). De ce fait, il se trouverait tout à fait exclu de la présente étude si quelques bizarreries de l'écoulement ne suggéraient aussi l'hypothèse d'un appauvrissement souterrain du fleuve entre le Bec d'Allier et Gien. En l'état des recherches hydrogéologiques dans ce secteur, les pertes de la Loire en amont de Gien en sont encore au point du débat ouvert. Force est donc présentement de borner l'examen à la vraisemblance, rien de plus, du phénomène et ce, à la lumière des faits complexes, parfois contradictoires, qui témoignent pour ou contre elle.

1. *Des faits insolites*

La médiocrité des apports au long des cent kilomètres qui séparent le Bec d'Allier et Gien est un premier motif de surprise. Pour la courte

(²) Dès le XVIIème siècle, la source du Loiret suscita l'intérêt scientifique mais le mérite revient à SAINJON d'avoir montré, au XIXème siècle, que la Loire subissait des pertes entre Guilly (hameau de Bouteille, à 41 km en amont d'Orléans) et Orléans et qu'elle récupérait ses eaux avec le Loiret et même avant la confluence de cet affluent. En fait, les jaugeages postérieurs ont montré (et surtout à partir de 1958 ceux de la 4ème Circonscription Electrique) que le Loiret ne constitue pas le seul exutoire et que la Loire récupère entre Orléans et Chaingy beaucoup plus qu'elle ne perd entre Bouteille et Orléans : elle bénéficie, grâce aux relations complexes établies entre la nappe des alluvions et le réseau aquifère des calcaires de Beauce, d'apports de cette nappe de Beauce.

cf. M. CAUDRON, M. ALBINET, S. COTTEZ, J. MARGAT (1965) - N. DEPREZ et C. MEGNIEN (1965) - N. DEPREZ (1971).

période des quinze dernières années durant laquelle les débits à Nevers et Pont-du-Guétin d'une part, et à Gien d'autre part, sont comparables, le module fait apparaître un pauvre gain moyen de 12,2 m^3/s, soit un débit spécifique de 3,8 $l/s/km^2$. Ces chiffres, d'évidence, ne sont pas à la mesure d'un bassin de 3.175 km^2 drainés, de surcroît, non par un seul cours d'eau mais par nombre de courtes rivières dont la Vrille, par exemple, une des plus importantes, a 200 km^2 seulement de surface réceptrice. L'accroissement moyen du module est de 3,9 % pour une augmentation totale du bassin d'environ 10 %. Certaines années, comme en 1968 et en 1969, la faible proportion dont aurait augmenté le débit (1,4 %) est plus petite que l'erreur systématique de 2 à 3 %. Et, en 1965, d'après les valeurs publiées, le module pour Gien (421 m^3/s) aurait même été inférieur de 4 m^3/s à ceux additionnés de la Loire (250 m^3/s) et de l'Allier (175 m^3/s) à Fourchambault !

Comparés aux débits de régions voisines, ces apports à la Loire en provenance du Berry et de la Puisaye paraissent fort médiocres. L'investigation — nécessairement indirecte puisque la Besbre et la Sioule sont, avant Gien, les derniers tributaires de la Loire et de l'Allier régulièrement jaugés — révèle, par soustraction, pour la même période de 1955 à 1969, les ordres de grandeur suivants :

Surfaces partielles comprises entre deux stations de jaugeage	*Bassin versant (km^2)*	*Module (m^3/s)*	*Débit spécifique ($l/s/km^2$)*
LOIRE			
de Bas-en-Basset à Villerest	3.220	29,2	9,06
de Villerest à Digoin	2.810	18,5	6,6
de Digoin à Nevers	9.045	87,3	9,65
ALLIER			
de Vic-le-Comte à Billy (moins la Dore en amont de Giroux)	2.799	23,2	8,3
de Billy à Pont-du-Guétin (moins la haute Sioule)	3.960	25,8	6,5
du Bec d'Allier à Gien	*3.175*	*12,2*	*3,8*

Ce brusque amaigrissement du débit entre le Bec d'Allier et Gien, se laisse-t-il discerner à l'occasion des crues ? Pour le vérifier et comme il n'est pas question, pour ces épisodes, de comparer des débits réellement jaugés, les volumes nets de crue à Nevers et au Guétin, d'une part, et à Gien, d'autre part, ont été calculés suivant la méthode exposée au chapitre IV de la 2ème partie (page 168 et tableau n° 54).

Ce qui ressort d'une telle analyse appliquée à cent dix-neuf cas, sur une période comprise entre 1955 et 1969, est, par dessus tout, une diversité des évolutions si grande que le plus modeste indice n'en peut être tiré à l'appui ou à l'encontre de pertes souterraines. L'échantillon examiné montre tout au plus qu'en moyene, le volume d'eau à Gien (déduit de l'hydrogramme de crue) a été supérieur de 14 % à ceux de Nevers et du Guétin réunis ; mais, une fois sur deux, la crue a progressé de moins de 10 % et une crue sur cinq s'est amortie au point qu'à Gien, le volume net est apparu plus faible qu'au Bec d'Allier. Les crues ainsi amoindries sont celles dont l'hydrogramme pointu traduit une montée rapide des eaux au-dessus du débit de base : par exemple, en octobre 1965, le débit maximum journalier passe, à Nevers, de 157 m^3/s le 26 septembre à 1.060 m^3/s le 3 octobre (rapport de 6,3) ; sur l'Allier, au confluent, le rapport est de 4,4 et, à Gien, entre le 27 septembre et le 4 octobre, le débit moyen journalier est presque multiplié par 6 (257 m^3/s le 27 septembre et 1.370 m^3/s le 4 octobre). D'après le calcul, le débit aurait perdu 5,8 % de son volume en cent kilomètres. Quelques cas comparables sont présentés ci-dessous.

Date du maximum à Gien	*Evolution du volume net de crue du Bec d'Allier à Gien (valeur relative)*	*Débit moyen journalier initial (m^3/s)*	*Débit moyen journ. maximum / Débit moyen journ. initial*
4 octobre 1965	−5,8 %	257	5,6
6 septembre 1956	−5,3 %	200	4,2
13 septembre 1965	−4,2 %	60	11,7
23 mai 1965	−4,1 %	220	5,5
13 novembre 1966	−4 %	285	2,23
7 novembre 1968	−2,2 %	784	4,7
24 décembre 1962	−1,6 %	80	9,3

Les dates de ces crues, en fin de saison chaude ou au début de la saison froide laissent supposer que l'évaporation et l'infiltration dans la nappe alluviale, alors peu remplie, enlèvent au fleuve une part non négligeable de ses eaux. Mais aucun indice ne permet de discerner avec certitude des pertes souterraines.

Inversement, une apparente dilatation du volume net de crue est souvent le fait d'intumescences prolongées plus fréquentes en saison

d'hiver avec hydrogrammes moins saillants que les précédents au-dessus d'un débit de base mieux nourri :

Date du maximum à Gien	*Evolution du volume net de crue du Bec d'Allier à Gien (valeur relative)*	*Débit moyen journalier initial (m^3/s)*	*Débit moyen journ. maximum / Débit moyen journ. initial*
14 avril 1963	+84 %	700	1,37
9 décembre 1960	+72 %	490	1,45
21 avril 1963	+67 %	620	1,03
7 avril 1958	+56 %	570	1,26
30 mars 1955	+52 %	350	1,57
18 juin 1963	+52 %	411	1,30
27 avril 1958	+45 %	570	1,38
28 mars 1959	+39 %	320	1,90
26 février 1955	+36 %	600	1,50
26 janvier 1959	+33 %	700	1,17
9 avril 1964	+29 %	535	1,54
20 mars 1958	+28 %	360	2,44

Ces tendances toutefois n'apparaissent que très vaguement sur un diagramme de dispersion des pertes ou gains du flot en crue en fonction du débit initial (figure 97). Trop de facteurs contribuent à donner sa forme à l'hydrogramme de crue pour qu'il soit justifié de n'en retenir qu'un comme cause exclusive. L'examen des volumes de crues n'apporte donc rien au débat.

Finalement, seuls des jaugeages précis, nombreux, rapprochés dans l'espace et multipliés tout au long du Val pourraient confirmer ou infirmer l'hypothèse d'un enfouissement définitif des eaux. De fait, dès qu'à cette fin, des mesures ont été faites, les données du problème se sont précisées. Ainsi, les campagnes de jaugeages effectuées systématiquement chaque été depuis 1954 à Nevers, au Guétin, à Givry (à l'aval du confluent) et jusqu'à Gien par les soins conjugués des 1ère et 4ème Circonscriptions Electriques et du Service des Ponts et Chaussées, démentent l'hypothèse de pertes quand les eaux sont très basses. En revanche, les corrélations entre débits de stations voisines sont moins bonnes quand le débit augmente. Plus précisément, au dessous de 200 m^3/s par exemple, les débits jaugés à Nevers et au Guétin se retrouvent exactement dans la Loire à Givry mais, quand le débit dépasse 300 m^3/s, le flot à Givry est, en général, inférieur aux débits cumulés des deux branches tributaires.

Les jaugeages ne font toutefois que mesurer les réductions de débit ; ils n'en disent pas la cause. Il faut donc les compléter par deux ensembles d'observations dont les unes s'attachent à la nature géologique du lit fluvial et du substratum, les autres aux caractères locaux de l'évapotranspiration.

2. *Les conditions géologiques de l'écoulement*

a) Peu d'infiltrations profondes

A sa sortie du Massif ancien, la Loire inscrit son cours dans les terrains sédimentaires du Bassin Parisien dont les couches du Trias au Crétacé supérieur s'inclinent vers le nord-ouest. Ce pendage principal est constant même dans les petits compartiments disloqués qui jalonnent la grande bande fracturée méridienne plus ou moins apparente de la Limagne à la Brie et que suit le cours de la Loire de Nevers à Briare (figure 98).

Dans le couloir d'effondrement occupé par le fleuve ainsi que de part et d'autre de ce fossé, sur les superficies drainées par les affluents de rive droite et de rive gauche, la disposition structurale et la nature des formations géologiques rendent les conditions de l'écoulement fort variées et fort complexes. La description minutieuse, malheureusement partielle, en a été faite par J.L. THUILLIER (1969) dans un riche mémoire relatif à la partie septentrionale du bassin entre Cosne et Gien (3). Ses observations ajoutées aux autres connaissances géologiques générales sur le Bassin de Paris méridional (4) instruisent sur les caractères d'ensemble qui président à l'interprétation du débit de la Loire entre le Bec d'Allier et Gien.

Sur ces 3.175 km² de bassin, sont juxtaposés des domaines propices au ruissellement et d'autres, au contraire, où les eaux pluviales s'infiltrent plus facilement. Les espaces superficiellement humides sont, au total, assez étendus. Ils correspondent d'abord aux affleurements de roches imperméables : niveaux à dominante marneuse du Jurassique inférieur aux marges du Berry et du Bourbonnais, ou encore auréole complexe argilo-sableuse du Crétacé inférieur dans les collines humides et boisées de Puisaye (bassin de la Vrille). Mais les eaux superficielles abondent aussi après les pluies sur les formations tertiaires, le plus souvent imperméables, couvrant la craie sous-jacente (en haute Puisaye, par exemple, dans le haut bassin de la Trézée, dernier petit affluent de rive droite

(3) L'étude (235 pages dactylographiées et 20 planches hors-texte) est un mémoire de géologie présenté au Conservatoire National des Arts et Métiers pour l'obtention d'un diplôme d'ingénieur C.N.A.M. et soutenu en juin 1969. Il n'a malheureusement pas été publié.

(4) cf., outre les rapports précédemment cités de la Ville de Paris, du B.R.G.M. et d'E.D.F. : R. ABRARD (1950, 1953, 1961), BALTENBERGER et RECQ (1965), M. GIGNOUX (1950) et J. GRAS (1963).

avant Gien) ou sur le matériel fluvio-lacustre du couloir ligérien, et enfin sur les argiles de décalcification, fréquents témoins des nivellements successifs qui restent un trait morphologique dominant de toute la région (5). L'enfouissement des eaux se fait principalement dans les calcaires perméables et nus du Jurassique supérieur (Rauracien - Séquanien) du Donzyais et de la Champagne berrichonne qui est peu représentée sur le bassin, dans les assises calcaires et marno-calcaires du « piédestal » sancerrois et de la Puisaye (Kimméridgien et Portlandien) (6), et tout à fait au nord du bassin là où la craie n'est pas recouverte par les formations tertiaires argilo-sableuses. Dans cette zone crayeuse, les vallons secs, les pertes de ruisseaux temporaires, les affaissements du sol sont les marques visibles d'une circulation souterraine.

Pour plusieurs raisons néanmoins, il semble qu'en dépit de la nature absorbante de certaines parties du substratum et malgré un pendage général de ces couches vers le nord-ouest, le drainage des eaux souterraines hors du bassin soit relativement limité entre le Bec d'Allier et Gien.

Première raison, dans les zones d'affleurement des terrains par lesquels se fait essentiellement l'alimentation des grandes nappes souterraines régionales (nappe du Séquanien-Rauracien, nappe de l'Albien, nappe de Beauce, sans communication entre elles), la nature des couvertures superficielles ou les faciès rocheux eux-mêmes ne favorisent pas localement l'infiltration. La preuve en est donnée par J.L. THUILLIER à propos de l'Albien dont les affleurements sableux (Albien inférieur C^1, sables de la Puisaye C^{2b}) couvrent ici d'assez grandes surfaces mais présentent des caractères extrêmement hétérogènes avec nombreuses traînées argileuses qui ne facilitent pas la pénétration des eaux en profondeur (7).

La seconde raison est que les alluvions anciennes et récentes tapissent les vallées dont le fond, colmaté par les éléments transportés les plus fins, est, par conséquent, étanche. C'est ainsi que les affluents de la Loire, en pénétrant dans le Val, ne participent pratiquement pas à l'alimentation de la nappe alluviale : malgré un long parcours parallèle au fleuve, leurs eaux ne disparaissent pas dans les alluvions. Sur la rive gauche, la Judelle et la Venelle sont les seuls cours d'eau entre Cosne et Gien qui apportent localement de très légères déformations dans le plafond de la nappe alluviale.

(5) cf. la bordure sud-orientale du bassin, couverte par la forêt, des « Vaux de Nevers » aux sources de la Nohain.

(6) L'expression est de J. GRAS (1963) et désigne le soubassement jurassique de la « cuesta » crétacée, région au relief vigoureux d'éperons et de collines.

(7) Les zones d'affleurement ont été étudiées en détail dans les régions de Saint-Amand en Puisaye et de Santranges de part et d'autre de la vallée de la Loire. Ces formations transgressives, beaucoup moins épaisses que dans l'est du Bassin de Paris, ont dû se déposer en bordure d'un littoral sinueux dans des conditions locales très variables, probablement dans des lagunes alternativement ouvertes et fermées sur la mer.

Enfin et surtout, la Loire et ses affluents, à cause de la structure et du relief, récupèrent la plus grande partie des eaux qui pourraient s'être infiltrées en surface. La carte isopiézométrique du premier niveau aquifère dressée par J.L. THUILLIER à partir de quelque trois cents puits et sources répartis sur tout le bassin entre Cosne et Gien indique avec une grande netteté, par des courbes sensiblement parallèles à la Loire, que l'écoulement souterrain, perpendiculaire au Val, est, à droite comme à gauche du fleuve, dirigé vers lui. Le fossé ligérien dont les failles bordières accentuent le caractère de bassin structural se comporte comme un véritable collecteur des eaux souterraines. Au pied des coteaux, l'affleurement des niveaux aquifères détermine des sources ou bien assure, sous les alluvions, l'alimentation de la nappe alluviale.

Les isopièzes de la nappe albienne (en 1840, 1920, 1935, 1964) révèlent également, à un niveau plus profond, un drainage vers la Loire et ce, précisément, jusqu'à Gien : au delà, l'attraction du Val disparaît ; en deçà, l'incision, par l'axe ligérien, des assises sédimentaires successives assure le retour au fleuve des eaux soustraites au ruissellement de surface (figure 99). Les enseignements de la carte isopiézométrique albienne sont illustrés et confirmés par deux faits observés entre Cosne et Léré à la traversée des sables de l'Albien. D'une part, à hauteur de Myennes, le plafond de la nappe alluviale est soulevé comme par une enflure que peut seule expliquer l'arrivée, sous les alluvions, d'eaux infiltrées dans ces mêmes formations qui affleurent de part et d'autre du Val. D'autre part, un peu plus au nord, entre la Bouëlle et la Madelaine et à moins de cinq cents mètres environ du fleuve, l'eau qui sourd de deux puits artésiens traversant les alluvions ressemble, par ses caractères de résistivité et de faible minéralisation, à celle qui vient directement des sables albiens.

Tous ces faits convergent pour réduire la probabilité de pertes dans le substratum rocheux du bassin aux dépens du débit de la Loire entre le Bec d'Allier et Gien. A supposer — suivant l'hypothèse faite par J.L. THUILLIER pour la barre rocheuse de Cosne mais, il le reconnaît, sans indices précis à ce sujet ([8]) — que le plancher du lit fluvial, irrégulier sous les alluvions, soit coupé de failles transversales par lesquelles disparaîtraient une partie des eaux du fleuve, ces pertes devraient être relativement plus sensibles sur les débits d'étiage qu'en eaux moyennes. Or c'est, au contraire, quand le débit est supérieur à 300 m^3/s, non pas en basses eaux, que les jaugeages récents, au moins entre le Bec d'Allier et Givry-Fourchambault, ont décelé des baisses de débit. L'infiltration et la circulation des eaux de Loire dans l'épais manteau alluvial de la vallée seraient-elles donc à l'origine de ces anomalies ?

([8]) Y. BABONAUX a repéré entre le Bec d'Allier et Gien les barres rocheuses de Marzy entre le Bec d'Allier et Givry, la Marche à trois kilomètres au sud de la Charité, Villechaud un peu en amont de Cosne et Rivotte près de Briare (Y. BABONAUX, 1970).

b) **Le rôle de la circulation des eaux dans les alluvions du Val**

Il a déjà été dit à propos de l'amortissement des crues (9) que l'eau de la nappe alluviale a une triple origine : les précipitations sur le Val, l'apport des coteaux et le fleuve. Des trois, le dernier est celui qui a le rôle le plus grand. Sans que la proportion exacte ait pu en être déterminée, certaines évaluations de la Ville de Paris lui attribuent environ, en moyenne, 80 % de l'alimentation totale (10). Il est également certain que, quel que soit le niveau du fleuve, celui-ci draine les eaux contenues dans les alluvions. Là où elles ont été dressées, les cartes isopiézométriques de la nappe alluviale en font foi.

Les aspects locaux de la circulation dans les alluvions se révèlent de plus en plus complexes à mesure que se multiplient les observations. Les couches sableuses sont d'épaisseur (jusqu'à quatorze mètres), de granulométrie et de perméabilité très variables ; les interférences, également très diverses, entre les apports d'eau plus ou moins abondante, plus ou moins chaude, plus ou moins dense, donnent naissance à des circulations multiples et changeantes. Pour élucider le problème précis posé par la mauvaise corrélation entre débits de stations voisines seulement quand le volume d'eau augmente, un seul mécanisme importe en l'espèce, celui de l'évolution de la nappe alluviale en fonction du niveau de la Loire.

Dans une vue schématique, deux situations sont à distinguer : l'écoulement en basses et hautes eaux. Lors des étiages, les niveaux des eaux, originaires respectivement des coteaux et du fleuve, s'ordonnent suivant le profil de la nappe n° 1 dessinée à la figure 100. Le trait notable ici est l'abaissement régulier, à partir du coteau, du niveau piézométrique jusqu'au voisinage du fleuve dont les eaux, latéralement, s'infiltrent peu dans les alluvions. Quand l'eau monte entre les berges, la partie de nappe alluviale nourrie par le fleuve grossit et s'étend. Le profil prend assez rapidement (11) la position 2 inscrite sur le croquis. Les eaux ainsi répandues dans les alluvions finiront par retourner au fleuve mais plus ou moins directement, plus ou moins vite. Les mesures physiques et chimiques ainsi que le repérage par traceurs du sens et de la vitesse de l'écoulement dans la nappe montrent, en effet, des diversités dans la circulation à différentes profondeurs. L'eau peut notamment être conduite

(9) cf. chapitre IV, 2ème partie.

(10) Les méthodes employées jusqu'ici se fondent principalement sur les mesures de température et de la vitesse de l'eau, et sur l'analyse chimique. L'eau originaire des coteaux est la plus fraîche (11 °C environ sans grande variation). La température de l'eau de Loire oscille suivant la saison et peut dépasser en été 22 °C. Sous les alluvions, la température moyenne de l'eau est de l'ordre de 14 °C et peut monter en septembre jusqu'à 17 °C.

(11) L'eau en provenance de la Loire chemine plus vite que celle du coteau. Dans les alluvions soumises à une circulation alternée, les éléments les plus fins peuvent être entraînés, d'où résultent une porosité et une perméabilité plus élevées.

en d'anciens lits de la Loire, méandres ou parties de méandres fossiles, communiquant plus ou moins, et les suivre. Il est aussi prouvé que des courants souterrains vont au plus court à travers courbes et méandres, suivant la corde qui sous-tend l'arc.

C'est là sans doute une simplification des faits à laquelle, pour interpréter les variantes locales, il faudrait ajouter les effets qu'entraînent la largeur du lit majeur et le profil longitudinal du plancher alluvial, l'influence des levées, les « pertes » du canal latéral, les oscillations saisonnières de ce qui vient des coteaux, le rôle des affluents, celui des pluies etc. Cette schématisation suffit cependant pour expliquer, sans recourir à l'hypothèse des pertes définitives, les chutes de débit constatées entre le Bec d'Allier (Nevers + Le Guétin) et Givry-Fourchambault lors des jaugeages en eaux moyennes : les détournements provisoires ne suffiraient-ils pas à en rendre compte ? Et il est sûr que la configuration du Val en cet endroit (rappelée par la figure 101) peut être à l'origine des bizarreries de l'écoulement, lesquelles, si cette explication est la bonne, ne se produiront pas quand les eaux seront à l'étiage, toutes rassemblées dans le lit mineur.

Cette conjecture peut encore gagner en vraisemblance si elle s'accorde avec la mesure de l'évapotranspiration.

3. *Les prélèvements de l'évapotranspiration*

La comparaison des indices de pluie et de débit sur les 3.175 km² entre le Bec d'Allier et Gien fait apparaître un déficit annuel moyen de 629 mm pour les quinze dernières années, de 1955 à 1969, soit :

P (indice de précipitations)		P′ (indice d'écoulement)		Déficit
750 mm	—	121 mm	=	*629 mm .*

Il est donc quelque peu supérieur aux déficits fluviaux habituels, compris entre 450 et 600 mm, dans les plaines de pays tempérés océaniques. Toutefois, comme ce bassin n'est sujet ni aux ruissellements massifs et prompts ni à l'infiltration rapide en profondeur et que les pluies y sont, en général, peu intenses et plutôt abondantes en été (12), ce déficit de 629 mm n'a rien de nettement anormal. Pour le bassin voisin de l'Yonne en amont de Gurgy (3.740 km²), en pente bien plus forte et sensiblement plus arrosé (P = 938 mm), P. FONTAINE (1964) n'a-t-il pas constaté précisément un même déficit de 628 mm ? Et, dans une étude sur les bilans des affluents ligériens de rive gauche entre Gien et Nantes, H. VIVIAN

(12) Pour la période 1955-1969, 52 % des pluies au cours des six mois « chauds » de l'année.

(1970) a découvert pour ces bassins des déficits globaux de 537 à 707 mm, supérieurs dans l'ensemble aux valeurs estimées par M. PARDE (1964 a) ou admises par WUNDT dans des conditions analogues de température et de pluviosité.

La possibilité d'un déficit s'élevant à 629 mm dans le pays nivernais-berrichon reçoit le renfort d'une double confirmation : la première est donnée par le calcul de l'évapotranspiration potentielle fondé sur les conditions de température et de radiation solaire ; la seconde réside en une courte série de jaugeages faits au XIXème siècle par les ingénieurs du Service de la Loire sur les petits affluents des deux rives entre Briare et Sully s/Loire et dont les résultats sont conservés aux Archives d'Orléans ([13]).

a) Formules d'évapotranspiration potentielle

La méthode de THORNTHWAITE (R. ARLERY, M. GARNIER, R. LANGLOIS, 1955) n'exige qu'un minimum de données climatiques : seule la température de l'air est prise explicitement en compte. En l'occurence, les données de Nevers, les seules existantes dans la région, ont été utilisées dans la formule

$$ETP = 16 \frac{(10\ t°)^a}{I} . F(\lambda)$$

où t° est la température moyenne de la période considérée, ici 10°4, où a est une fonction complexe de l'indice thermique annuel I, somme des douze indices thermiques mensuels, $i = (\frac{t}{5})^{1,514}$, où F ($\lambda$) est un terme correctif, fonction de la durée théorique d'insolation à la latitude considérée, ici 47° de latitude nord.

En moyenne globale, l'évapotranspiration pourrait ainsi s'élever, d'après THORNTHWAITE, à *643 mm* par an.

La seconde formule de L. TURC (1963), qui intègre non seulement l'indice de température mais aussi l'insolation réelle, donne certainement une meilleure approximation de la réalité :

$$\text{ETP annuelle} = \sum_{1}^{12} \text{ETP mensuelle}$$

$$\text{ETP mensuelle} = 0{,}4 \frac{t°}{t° + 15} (Ig + 50) \quad ([14]).$$

Ici, les deux paramètres, température et insolation, sont encore ceux de Nevers, probablement un peu faibles, ce poste ayant une situation assez excentrique à l'amont du bassin. Selon cette formule, la valeur de l'évapotranspiration potentielle est sensiblement supérieure aux résultats

([13]) Documents du Service régional des Ponts et Chaussées pris en charge en 1969 et classés par les Archives du Loiret. Dossier 30.887.

([14]) Pour la signification de chacun des termes, cf. chapitre précédent.

obtenus par la méthode de THORNTHWAITE : elle atteint *677 mm* et serait certainement un peu plus élevée encore si la température et l'insolation prises en compte étaient celles de tout le bassin.

Ainsi, quelle que soit la méthode d'évaluation, un premier fait est établi : l'évapotranspiration potentielle reste inférieure aux précipitations moyennes annuelles (P = 750 mm). Le déficit moyen annuel ne peut donc pas être limité, comme en maints bassins de la France méridionale ou méditerranéenne, par une relative faiblesse des précipitations. En fait, en cherchant une corrélation entre les déficits particuliers d'une part, et, successivement, la température annuelle particulière, la durée d'insolation ou les précipitations d'autre part, on s'aperçoit bien que les gros déficits particuliers correspondent aux années pluvieuses à forte pluviosité estivale (1958, par exemple, 1965 ou 1968). Et c'est entre les pluies et les déficits particuliers que la corrélation est la meilleure. Elle n'est cependant pas parfaite parce que, dans ce bassin, la réserve hydrogéologique qui n'est pas considérable mais extrêmement irrégulière fausse les bilans particuliers d'écoulement. En effet, si le déficit apparent de 1965, par exemple, a pu atteindre 1023 mm ([15]), c'est sans doute et surtout que l'année a été pluvieuse (983 mm) mais aussi qu'elle a succédé à l'année chaude et sèche de 1964 (P annuelle : 582 mm), pendant laquelle les effets naturels de l'évapotranspiration, ajoutés aux prélèvements artificiels dans la nappe alluviale pour l'arrosage des champs et des prés, ont beaucoup amoindri les réserves. Une partie des 1023 mm qui, en 1965, ont disparu entre Nevers et Gien aurait servi à reconstituer cette réserve.

Second fait remarquable, le déficit d'écoulement global de 629 mm est proche de l'évapotranspiration potentielle évaluée à 677 mm selon la formule de L. TURC ou 643 mm selon la formule de THORNTHWAITE. Ce faible écart, peu fréquent dans des régions de climat comparable, s'explique tant par la lenteur, voire la stagnation des eaux de ruissellement (bassin de la Trézée, par exemple), que par l'inhabituelle extension, relativement à la surface réceptrice totale, des fonds alluviaux et ceci, en raison de la présence, au milieu du bassin, d'un grand fleuve allogène. Point n'est besoin, par conséquent, de pertes souterraines définitives pour expliquer le déficit de l'écoulement en cette région.

b) Vérification par les bilans anciens

Cette information est précieuse parce qu'elle repose sur une série de jaugeages effectués avec le plus grand soin en 1858, 1859 et 1860 sur des petites rivières actuellement mal connues qui confluent entre Briare et le Bec de Cher. Sont seules retenues ici les données résumées dans

([15]) Le débit mesuré à Gien a été, en 1965, inférieur de 4 m^3/s à ceux de Nevers et Pont-du-Guétin réunis.

le tableau n° 87 et intéressant les bassins les plus proches de Gien (figure 98) qui, dans un ensemble de 435 km², sont ceux de :

l'Ocre	50 km²	affluents de rive gauche
La Nord-Yèvre (16)	97 km²	
La Quiaulne	110 km²	
La Ronce	25 km²	
La Sange	35 km²	
La rivière de Nevoy	25 km²	affluents de rive droite
La rivière de Moquesouris	45 km²	
La rivière de Dampierre	50 km²	

Ces petites rivières coulent principalement tantôt sur les alluvions récentes ou anciennes du Val, tantôt sur les sables du miocène dans lesquels sont fréquemment intercalées ici des lentilles argileuses, tantôt sur les formations imperméables de la base du Burdigalien, de l'Aquitanien et de l'Eocène qui affleurent en biseau. L'infiltration profonde est de ce fait des plus réduites : sur quelques kilomètres carrés seulement des hauts bassins de rive droite et de l'Ocre supérieur où apparaissent les craies sous-jacentes. Encore importe-t-il grandement de préciser que les eaux de percolation alimentent les nappes superficielles des coteaux situés en bordure du lit majeur de la Loire. Or, d'après les sondages récents du B.R.G.M. (carte géologique de Châteauneuf s/Loire, édition 1971), la nappe alluviale du fleuve, dans la région considérée et ce jusqu'à une ligne Châteauneuf - Tigy, se tient toujours à une cote plus haute que celle de la Loire et son eau y fait donc retour sans perte au profit des aquifères sous-jacents (figure 98). C'est, au contraire, en aval de cette ligne Châteauneuf - Tigy que la surface piézométrique de la nappe alluviale est toujours située à une cote inférieure de trois mètres environ à celle du plan d'eau de la Loire aussi bien en période d'étiage qu'en période de crue. Les petits bassins étudiés se trouvent donc hors du domaine des pertes de la Loire moyenne.

La moyenne de pluviosité établie sur les deux années 1858 et 1859 donne, à Gien, une hauteur annuelle de 511 mm, très voisine de la valeur globale de 515 mm pour 1858-1887 (17). Corrélativement, les débits eux aussi peuvent être considérés comme « moyens ». Or les huit

(16) Cette rivière est aujourd'hui nommée la Notreheure.

(17) Les pluies portées ici sont celles du document original. Ce dernier retient, en effet, les pluies enregistrées à l'udomètre de Gien nouvellement installé (cf. Introduction, page 22) et qui, systématiquement, a sousestimé les hauteurs d'eau précipitées pendant les trente années dont nous avons retrouvé les valeurs mensuelles (1858-1887). Angot lui-même, quand il a critiqué toutes les valeurs régionales pour établir les normales 1851-1900, a jugé nécessaire d'augmenter la normale de 100 mm, ce qui, d'ailleurs restait encore insuffisant.

petits affluents ont apporté, en ces deux années, à la Loire une moyenne annuelle de

1,43 m^3/s pour 435 km^2, soit 3,3 $l/s/km^2$.

Le débit spécifique de la Nord-Yèvre fut de 4,8 $l/s/km^2$ et celui de la Quiaulne 3,8 $l/s/km^2$. Ce sont là des valeurs tout à fait comparables au débit moyen issu des 3.175 km^2 compris entre le Bec d'Allier et Gien. En effet, pendant les quinze années 1955-1969, elles aussi assez représentatives de la « normale » ([18]), la Loire, sur ce parcours de cent kilomètres, s'est enrichie en moyenne par an de

12,2 m^3/s soit 3,8 $l/s/km^2$.

Minime sous le ciel de Gien, l'augmentation du débit l'est pour la Loire comme pour ses affluents.

Ainsi en est-il des débits comme des déficits d'écoulement : les valeurs actuellement observées ne sont pas aberrantes. De toutes manières, s'il y avait des pertes définitives, elles seraient seulement d'un ordre de grandeur à peine égal à l'erreur systématique sur les débits à Gien. Le déficit moyen annuel, en effet, ne pourrait raisonnablement tomber à moins de 580 ou 550 mm. La différence porterait donc au maximum sur 50 mm ou même 80 mm, soit 5 m^3/s ou 8 m^3/s, moins de 1,5 % ou 2,4 % du module normal à Gien. Cette valeur de 8 m^3/s est d'ailleurs très proche du débit sous-alluvial annuel moyen, estimé à 9 m^3/s par la Circonscription Electrique Centre et Ouest.

II. RESUME DU BILAN

A. L'abondance moyenne des rivières dans le bassin supérieur de la Loire

L'analyse de l'écoulement sur les affluents prépare à une appréciation générale de l'abondance sur l'ensemble du bassin. A cette fin, ont été élaborés le tableau n° 88 et la figure 102 qui en est l'illustration. Y figurent non seulement les bassins retenus dans l'étude des déficits mais ceux qui correspondent aux stations de jaugeage installées au fil des eaux ligériennes jusqu'à Gien. Les chiffres disponibles, malgré leur insuffisance, ont une relative valeur indicative. La carte combine les deux indices par lesquels sont exprimées les valeurs de l'abondance : le module, en m^3/s, représenté par la largeur proportionnelle des cours

([18]) Pour ces quinze années 1955-1969, le débit observé à Gien a été de 318 m^3/s. Le débit « naturel », en tenant compte des prélèvements de Montpezat, aurait donc été de 325 m^3/s. La moyenne globale de cinquante-quatre ans (1918-1971) est de 335 m^3/s.

d'eau, et le débit spécifique, en l/s/km², inscrit en figuré distinct sur chaque rivière.

La variété des écoulements locaux qui apparaît immédiatement est bien le reflet de toutes les différenciations régionales et, d'abord, des inégalités dans l'alimentation pluviale.

Les valeurs spécifiques les plus fortes atteignent près de 40 l/s/km² sur les premiers petits affluents de la Loire (Vernazon, Gage, Tauron, Veyradeyre) assurant au fleuve à Arlempdes, à l'issue de 418 km², un module de 10,4 m³/s, soit 24,8 l/s/km². L'Allier à Lavalette, après 394 km² de bassin versant, est presque aussi abondant : 9,1 m³/s, soit 23,1 l/s/km², bien que la déficience des affluents de rive gauche se fasse très vite sentir dès le Langouyrou (23,6 l/s/km² seulement pour 66 km²). Le haut Alagnon, avec au moins 45 l/s/km² à Murat pour 20 km² et encore 20 l/s/km² à Joursac (321 km²), puis les Couze de Chambon et surtout de Pavin (21,2 l/s/km² à Saint-Floret pour 219 km²) se distinguent aussi par leur relative abondance. Un peu moins forts, les débits des petites rivières divergeant du môle du haut Forez atteignent ou dépassent légèrement 20 l/s/km² pour moins de 100 km² de bassin versant. Cependant, ces valeurs maximales très localisées paraissent modestes en regard des débits enregistrés sur les versants occidental et méridional du Massif Central :

Dordogne à Saint-Sauvès	pour	87 km² :	39,7 l/s/km²
Cère à Comblat-le-Pont	pour	88 km² :	49 l/s/km²
Maronne à Sainte-Eulalie	pour	112 km² :	35,9 l/s/km²
Rhue à Condat	pour	187 km² :	31 l/s/km²
Tarn à Cocurès	pour	189 km² :	36,5 l/s/km²
Chassezac à Thinettes	pour	445 km² :	37,5 l/s/km²
Vienne à Saint-Priest Taurion	pour	1165 km² :	22,5 l/s/km²
Ardèche à Sauze Saint-Martin	pour	2240 km² :	28,4 l/s/km²

Pour une superficie équivalente à ce dernier bassin, l'Allier à Vieille-Brioude a un débit spécifique deux fois moindre !

Une grande médiocrité caractérise maints bassins montagneux de l'intérieur du Massif Central : seize modules, par exemple, s'échelonnent, pour moins de 500 km², entre 8,7 l/s/km² (Borne à Chadrac, à l'issue de 430 km²) et 15 l/s/km².

Mais, surtout, les disparités entre bassins voisins diversement exposés aux afflux pluvieux sont particulièrement accusées dans les débits. La liste des modules pour les rivières classées par taille des bassins versants en donne de nombreux exemples dont certains sont très apparents sur la carte : contrastes entre les ruisseaux de Fouragettes et de Holme se jetant tous les deux dans la haute Loire à Goudet ; entre le Miodex (8,7 l/s/km²) évoluant sur le plateau du Livradois et la Faye dévalant le versant occidental du Forez (21,6 l/s/km²). La dissymétrie est particulièrement marquée entre la haute Loire vellave et la Borne. Pour

des superficies très voisines, le fleuve (418 km² à Arlempdes) roule, en moyenne, 10,4 m³/s soit 24,8 l/s/km² et la Borne 3,7 m³/s soit 8,7 l/s/km². Le haut Lignon du Velay à Versilhac (17,6 l/s/km² pour un bassin de 350 km²) et l'Ance du Nord à Laprat (12,4 l/s/km² pour 354 km²) constituent, avec moins de relief cependant, un couple d'opposition comparable. Contrairement à ce que leur situation pourrait d'abord laisser croire, les affluents de rive droite des deux grandes artères méridiennes ne sont pas toujours les plus favorisés. Ainsi, la Coise sur le haut Lyonnais est abritée des vents du sud par le Pilat et des vents d'ouest par le massif de Pierre-sur-Haute qui est un écran protecteur lointain mais efficace : son débit est des plus faibles, 8,7 l/s/km². Au contraire, l'Aix et la branche septentrionale du Lignon forézien, adossés au bord sud des Bois Noirs et de la Madeleine, bénéficient des effluves humides de l'ouest et du sud-ouest qui pénètrent par le col de Noirétable.

Cependant, les rivières les mieux alimentées font un peu figure d'exceptions sur un fond de pauvreté généralisée des débits. Par quelques brèches dont les hautes vallées de la Loire et de l'Allier sont les plus larges (carte-figure 102), la proue qu'évoque la partie méridionale du Massif Central est, comme accidentellement, balayée par les vagues extérieures. Au contraire, là où la protection est assurée, les débits spécifiques sont faibles, ces contrastes étant particulièrement accusés dans la moitié méridionale, la plus montagneuse et la plus accidentée du bassin. Dans la moitié septentrionale, les différences entre les modules de rivières voisines s'atténuent en même temps que l'altitude et les hétérogénéités topographiques. La carte donne une première image de cette dualité hydrologique.

L'examen de *l'abondance annuelle de l'amont vers l'aval* le confirme. Exceptionnellement fort (près de 40 l/s/km² à Rieutord), le module spécifique de la Loire tombe rapidement. A Arlempdes, après 418 km², il n'atteint pas tout à fait 25 l/s/km², puis il perd 10 l/s/km² dans les 897 km² qui suivent, à cause de la faiblesse des apports dans la traversée du bassin du Puy : alors que la superficie du bassin triple d'Arlempdes

LOIRE

Station	*Bassin versant (km²)*	*Module (m³/s)*	*Débit spécifique (l/s/km²)*
Rieutord	62	2,46	39,8
Arlempdes	418	10,4	24,8
Chadrac	1.315	20	15,2
Bas-en-Basset	3.300	41,5	12,5
Villerest	6.520	66,7	10,5

à Chadrac, le module double à peine. Et, malgré le Lignon du Velay qui fournit à l'artère maîtresse près de 18 l/s/km² (12,3 m³/s pour 700 km²), le débit spécifique du fleuve s'abaisse à 12,5 l/s/km² à Bas-en-Basset et encore plus bas à Villerest : 10,5 l/s/km². Sur l'Allier, la chute est du même ordre quoique un peu moindre.

ALLIER

Station	*Bassin versant (km²)*	*Module (m³/s)*	*Débit spécifique (l/s/km²)*
Lavalette	394	9,1	23,1
Alleyras	934	14,6	15,5
Vieille-Brioude	2.260	28,6	12,7
Vic-le-Comte	5.380	62,5	11,6

Ensuite, sur les deux rivières, l'appauvrissement est moins rapide :

LOIRE

Station	*Bassin versant (km²)*	*Module (m³/s)*	*Débit spécifique (l/s/km²)*
Digoin	9.330	89	9,55

ALLIER

Station	*Bassin versant (km²)*	*Module (m³/s)*	*Débit spécifique (l/s/km²)*
Billy	9.000	91	10,2
Pont-du-Guétin	14.340	136,8	9,7

Et, en aval de Digoin, le débit spécifique de la Loire décline après seulement le Bec d'Allier :

Station	*Bassin versant (km²)*	*Module (m³/s)*	*Débit spécifique (l/s/km²)*
Nevers	18.375	177	9,6
Givry	32.715	314	9,6
Gien	35.890	335	9,3

Le débit spécifique à Gien, au cours des mêmes années de référence que pour Nevers et Pont-du-Guétin, est de 9,1 l/s/km². Pour un bassin quatre fois plus grand (3,85) à Gien qu'à Digoin, le module est multiplié par 3,8.

Une telle permanence du débit spécifique alors que s'agrandit la surface réceptrice et que l'altitude se réduit vers l'aval est certainement inhabituelle. Cette curiosité néanmoins s'explique par plusieurs traits de la configuration du bassin. D'abord, l'exposition et le relief valent aux régions d'aval, plus basses dans l'ensemble ([19]), une pluviosité moyenne annuelle égale sinon supérieure à celle de l'amont pourtant beaucoup plus élevé. Les hauteurs moyennes de précipitations sur des surfaces partielles, obtenues par planimétrage des cartes d'isohyètes relatives à la période de trente ans 1931-1960 en sont la meilleure illustration (tableau n° 89).

Le bassin de l'Arroux, développé sur 3.300 km², reçoit en moyenne 910 mm de pluie annuelle, autant que le bassin de l'Allier en amont de Vieille-Brioude, beaucoup plus élevé et plus petit (2.260 km²). La haute Loire en amont de Bas-en-Basset, sur une superficie égale à celle du bassin de l'Arroux, reçoit seulement 8 mm de plus (918 mm). Le bassin de l'Aron, sur 1.640 km², est à peu près aussi arrosé (912 mm) que celui de la Dore (940 mm sur 1.692 km²). La Nièvre (650 km²) reçoit autant d'eau que l'Ance du Nord (520 km²) au cœur du Massif Central, à près de 1.000 mètres d'altitude moyenne. Sur les cartes d'isohyètes, la moitié de l'entier bassin en amont de Gien s'étend au-dessous de la courbe de 800 mm de précipitations annuelles :

49 % pour la période 1891-1930,
42 % pour la période 1921-1950,
59 % pour la période 1931-1960,
48 % pour la période 1951-1970.

Mais, dès l'amont, les surfaces recevant de 600 à 800 mm occupent déjà une large part de tous les bassins : à peu près 40 % sur ceux de la Loire avant Bas-en-Basset et de l'Allier en amont de Vieille-Brioude, 35 % sur le bassin de l'Alagnon, l'un pourtant des plus arrosés.

Cette première cause de relative égalité dans l'abondance spécifique du fleuve entre Digoin et Givry trouve un renfort dans un autre trait de la configuration du bassin : allongée du sud au nord, la Loire traverse plusieurs domaines climatiques que la carte des hydrologies saisonnières a mis en évidence (figure 19, hors-texte) Or, du Charolais et du Morvan, elle reçoit des affluents surtout abondants en saison froide. Les valeurs annuelles du débit, qui masquent les grosses irrégularités saisonnières, n'en trahissent pas moins la conjugaison, en hiver seulement, des pluies

([19]) cf. profil hypsométrique du bassin (figure 2).

relativement abondantes et d'une faible évapotranspiration. Ainsi, à Digoin, après 9.330 km², le débit brut moyen annuel pour la période de 1958 à 1968 a été de 81,5 m³/s, et entre Digoin et Nevers, sur 9.045 km², l'apport moyen est de 87,3 m³/s, légèrement supérieur au précédent. Mais c'est seulement en hiver et au printemps que se manifeste cette supériorité, détaillée dans le tableau n° 90.

Enfin, au Bec d'Allier, le bassin de la Loire, développé sur 18.375 km², s'agrandit brusquement de 14.340 km². De toute évidence, l'affluent venu de territoires ressemblant à ceux que traverse la Loire ne peut guère modifier l'écoulement spécifique de l'artère maîtresse. Grâce à l'apport de l'Allier, la décadence du module qui s'amorce très vite après la confluence, de 9,6 l/s/km² à Givry à 9,1 l/s/km² à Gien, n'est encore, en ce lieu, que peu sensible à l'échelle de l'entier bassin.

B. L'abondance moyenne à Gien

Intégrant des modules particuliers très variés dont le graphique de la figure 103 donne la succession chronologique, l'abondance moyenne annuelle de la Loire à Gien pour cinquante-quatre ans (1918-1971) est de 333 m³/s si les valeurs annuelles prises en compte depuis 1955 sont les débits réellement mesurés, ou 335 m³/s si les débits sont «naturels» suivant la terminologie admise (20).

Une faiblesse prolongée des modules au cours des deux décennies de 1941-1960 puis une plus grande régularité interannuelle depuis 1951 peuvent laisser aux contemporains l'impression inquiétante d'une anémie progressive du fleuve. Cette inquiétude n'a pas lieu d'être. En effet, la courbe des moyennes mobiles de dix ans, franchement ascendante et dépassant la moyenne globale de cinquante-quatre ans, rassure à cet égard : le volume total des eaux en provenance de l'amont chaque année tend actuellement plus à croître qu'à diminuer (figure 103).

Cette tenue de l'abondance va avec une remarquable constance du rapport entre indices de précipitations et d'écoulement ainsi que le montrent les bilans globaux dont les éléments sont rassemblées au tableau n° 91. En effet, le quotient d'écoulement $\frac{P'}{P}$ est de :

0,344 pour la période 1921-1950,
0,348 pour la période 1931-1960,
0,347 pour la période 1951-1970.

Il est de fait, toutefois, qu'en fonction des débits réellement mesurés et non plus des débits dits naturels, le quotient d'écoulement au cours de cette dernière période est seulement de 0,340.

(20) c'est-à-dire reconstitués en fonction des prélèvements effectués à l'amont.

Les précipitations (d'après les cartes d'isohyètes dont une seule est reproduite à la figure 104), se sont élevées respectivement à :

835 mm pour la période de 1891 à 1930,
856 mm pour la période de 1921 à 1950,
825 mm pour la période de 1931 à 1960,
838 mm pour la période de 1951 à 1970.

La quantité « normale » de pluie évoluerait donc entre 840 et 850 mm, plus de la moitié (55 à 57 %) tombant en moyenne au cours des mois de mai à octobre (figure 104).

Pour les modules globaux comme pour les pluies, la période récente de 1951 à 1970, bien que trop brève pour être en tous points représentative, donne un chiffre de 331 m^3/s (en débits dits « naturels ») très proche du module de cinquante-quatre ans (335 m^3/s). Elle vaut d'être retenue parce qu'elle permet d'apprécier les effets, sur le bilan moyen, des prélèvements dont la moyenne annuelle ressort ainsi à : 331 m^3/s (débits naturels) − 325 m^3/s (débits mesurés) = 6 m^3/s, inégalement répartis sur les différents mois de l'année à raison de :

16,8 % en janvier,
12,5 % en février,
14,1 % en mars,
16,8 % en avril,
11,2 % en mai,
5,6 % en juin,
2 % en juillet,
1,4 % en août,
0 % en septembre,
9,8 % en octobre,
9,8 % en novembre,
0 % en décembre,

100 % année.

Rapportés à l'entier bassin, ces prélèvements de 1955 à 1969 ont représenté, par conséquent, une moyenne annuelle de 5 mm environ, ce qui est minime.

Au total, pour le demi-siècle, de 1920 à 1970, les différents termes du bilan moyen à Gien, exprimés en millimètres, sont vraiment très proches des évaluations de M. PARDE (1964 b) pour un siècle finissant vers 1960 (cf. ces différentes valeurs au tableau de la page suivante). La différence entre les chiffres des deux colonnes est la plus grande pour les déficits et elle est alors de 5 %, de l'ordre de l'erreur systématique : à s'en tenir aux valeurs jumelles comparées deux à deux, les résultats peuvent être considérés comme les mêmes. En revanche, l'équilibre des phénomènes dont les chiffres reflètent l'image n'est pas le même dans l'une et l'autre évaluation. Par rapport aux chiffres mesurés, l'estimation

Bilan à Gien		*Indices résultant des données expérimentales 1920-1970*	*Estimation de* M. PARDE *pour 1860-1960*
Précipitations	P	845 mm	825 mm
Ecoulement	P'	294 mm	302 mm
Déficit	P-P'	551 mm	523 mm
Quotient d'écoulement	$\frac{P'}{P}$	0,348	0,366

de M. PARDE est inférieure pour les pluies, supérieure pour les débits et inférieure pour les déficits.

Le déficit est d'ailleurs plus gravement encore sousestimé dans les évaluations par les formules de COUTAGNE (501 mm), L. TURC (475 mm) ou WUNDT (510 mm), certes approximatives ([21]). Toutes les formules générales mises au point pour le calcul de l'évapotranspiration en fonction de la température moyenne annuelle laissent échapper nécessairement, dans le cas particulier du bassin étudié, une partie du phénomène qu'elles prétendent mesurer, en raison de la concentration estivale des pluies et de la forte amplitude thermique annuelle. Le confirment les bilans des bassins élémentaires tant à l'amont ([22]) qu'à l'aval ([23]) ainsi que ceux de Gien.

Si l'on prend en considération, comme dans la deuxième formule de L. TURC, les températures moyennes mensuelles, les résultats sont améliorés sans, malgré tout, rejoindre complètement la réalité : la température moyenne mensuelle des mois d'hiver ignore les maxima, accompagnés d'une évaporation qui est loin d'être négligeable. C'est ainsi que les déficits constatés d'octobre à avril dépassent les valeurs de l'évapotranspiration potentielle : à Bas-en-Basset, par exemple, les déficits mesurés sont de 156 mm (1931-1960) et l'évapotranspiration potentielle est de 87 mm calculée par la formule de THORNTHWAITE, et de 79 mm par la seconde formule de L. TURC. Mais c'est à Gien, pour l'entier bassin, que le fait acquiert le plus grand relief (figure 105). En aucun mois d'hiver, le déficit apparent n'est inférieur à 14 mm et, au cours du semestre

([21]) Les calculs ont été faits en adoptant une température moyenne annuelle de 9° pour tout le bassin.

Selon COUTAGNE, le déficit $= P - \lambda P^2$ avec $\lambda = \frac{1}{0{,}8 + 0{,}14\,T}$

De L. TURC, c'est la 1ère formule qui a été utilisée, celle qui ne tient compte que de la température moyenne annuelle.

([22]) cf. 3ème partie, chapitre II.

([23]) cf. début du présent chapitre.

« froid », sa valeur s'élève presque au tiers du déficit annuel. L'évaporation hivernale explique que les quotients d'écoulement mensuels apparents ($\frac{p'}{p}$) d'octobre à avril soient, en moyenne, de 52 %, ce qui est faible pour un bassin montagneux au substratum imperméable.

La comparaison des deux bilans globaux de 1921 à 1950 et de 1931 à 1960 vient aussi à l'appui des conclusions précédentes (tableau n° 91). Les pluies d'été y apparaissent également abondantes (472 mm et 470 mm). Les pluies d'hiver, au contraire, ont été plus fortes au cours de la première période (384 mm et 355 mm). Or, dans les deux bilans, les écoulements d'hiver sont les mêmes (210 mm). C'est donc que, du surplus des pluies d'hiver dans le premier cas, les débits n'ont pas profité. Les possibilités de mise en réserve étant faibles, il faut conclure que la plus grande partie de ce surplus s'est évaporée.

En conclusion, dans ce bassin où les pertes souterraines définitives et les prélèvements artificiels sont pratiquement sans effet sur le module, la médiocrité de l'écoulement par rapport aux précipitations, en toutes saisons et de l'amont à l'aval, est peut-être à retenir comme éminemment caractéristique du bilan hydrologique à Gien.

CONCLUSION

La Loire, vraiment, en notre époque de conquêtes accélérées du savoir et de la technique, reste comme un défi à nos pouvoirs. Pourtant elle est depuis longtemps connue. Paul Valéry voyait d'abord dans la science un pouvoir d'agir (1). Le savoir est ici jusqu'à maintenant sans pouvoir.

*
* *

Dans un monde où l'intelligence pénétrant de plus en plus les phénomènes naturels finit par renouveler même les problèmes, nos connaissances sur la Loire demeurent remarquablement stationnaires. Les précisions numériques sur la grandeur des faits hydrologiques et leurs rapports de dépendance à l'égard d'autres faits naturels ajoutent finalement assez peu aux caractères essentiels depuis longtemps connus et que commençaient déjà à savoir les constructeurs des premières turcies aux temps mérovingiens.

La présente étude complète, nuance, précise maints traits d'une ancienne esquisse. Elle confirme généralement, infirme quelquefois, ce qui était présumé par analogies ou différences avec des bassins soumis aux mêmes régimes climatiques (tempérés océaniques). Ce qu'apporte de neuf aux conclusions acquises l'étude minutieuse de l'abondance et du régime ligériens, c'est que les grands défauts connus de l'irrégularité et de la pénurie estivale sont plus prononcés encore qu'il n'était jusqu'alors jugé. Ces principaux traits de la Loire et de ses affluents en amont de Gien se résument en quatre points.

1) L'*immodération* au cours de l'année et la *variabilité interannuelle des débits* atteignent leur plus grande intensité dans cette partie du bassin qui se distingue par là d'autres régions françaises comparables. Et ce phénomène a pour cause tant l'irrégularité de l'alimentation pluviale que l'évapotranspiration réelle. Celle-ci, s'exerçant sur des pluies de saison chaude sur les trois quarts du bassin, peut varier beaucoup suivant la température, l'aspect du temps, l'intensité des averses, leur succession

(1) P. VALERY. L'homme et la coquille, Variété, Bibliothèque de La Pléiade, tome I, page 899.

et leur date. La meilleure vérification en est donnée par la grande variabilité connexe des déficits d'écoulement particuliers dans certains bassins élémentaires étudiés, le Lignon vellave ou le Chapeauroux par exemple. Certaines années, le déficit peut être très, voire anormalement, faible (de 150 à 200 mm) parce que très peu de précipitations sont tombées pendant l'été ; l'année suivante, le déficit a pu s'élever à 600 ou 650 mm parce que des pluies abondantes, imbibant des altérites peu épaisses et poreuses mais sur des surfaces planes, ont été la proie facile de l'évaporation.

2) *La pluviosité moyenne* et donc *les débits sont, dans l'ensemble, médiocres dans les parties les plus montagneuses du bassin* alors que c'est de ces régions-là, précisément, qu'en général des eaux abondantes sont attendues (2). La carte des débits spécifiques (figure 102) est éloquente à cet égard et la comparaison entre les apports de la Loire en amont de Digoin, d'une part, et de Digoin à Nevers, d'autre part, a bien montré que les eaux d'hiver les plus abondantes sont fournies par le second secteur du bassin et non par le premier, ce qui est essentiel et ne semble pourtant pas avoir retenu jusqu'à maintenant l'attention. Encore les moyennes mensuelles de débits minimisent-elles la médiocrité estivale qui sévit de Rieutord à Gien. En juin, par exemple, le débit du Lignon du Velay est, en moyenne, de 10,3 m^3/s mais, une année sur deux (débit médian), il ne dépasse pas 6,9 m^3/s ; à Villerest, en octobre, le débit moyen est de 26,4 m^3/s et le débit médian est de 15,4 m^3/s seulement. Les deux valeurs à Vieille-Brioude sont de 20,2 m^3/s et 10,3 m^3/s !

3) Un troisième caractère, de longue date connu, vérifié et déploré, surtout lors des crues, a ponctué comme un refrain toute la présente analyse parce que c'est bien lui, en effet, qui domine la vie de la Loire : le fleuve est « toujours prompt à réagir aux caprices du climat et prêt à écouler au plus vite les eaux tombées sur son bassin » (E. de MARTONNE, 1942). *Ni à l'amont ni dans les plaines alluviales, ne se trouvent les éléments pondérateurs* que pourraient constituer, en raison de la taille et de l'altitude du bassin, les réserves lithologiques et neigeuses. Le rôle de la neige, notamment, ne se révèle pas seulement médiocre : à part quelques exceptions très localisées, il y a, de décembre à mai, moins

(2) N'est-il pas significatif que, dans la plupart des exposés sur les projets d'amélioration des étiages de la Loire, des arguments comme celui-ci soient avancés : « Le procédé consistera à emmagasiner pendant les huit mois pluvieux de l'année le maximum d'eau possible pour la restituer de juillet à octobre. D'où la provision de réservoirs dits d'étiage dans les hautes vallées du fleuve et de ses affluents dont les apports sont prépondérants dans la constitution de son régime. La masse des emmagasinements trouvera sa place dans les bassins de la Loire supérieure en amont de Roanne, et de l'Allier en amont du confluent de la Sioule ». Cf. A. RENAUD (1960) dont l'étude contient, d'autre part, des idées fort judicieuses.

de neige que de pluie et surtout moins de précipitations que de mai à octobre ; et, là où les précipitations d'hiver l'emportent, elles n'atteignent jamais 800 mm. Par surcroît, la fusion nivale est perturbatrice tant par son irrégularité d'une année à l'autre que par sa brusquerie quand elle se produit : déterminée par une élévation de température ou une averse pluvieuse, elle s'étend généralement aux entiers ou à une très grande partie des bassins dont l'altitude est peu différenciée.

4) Enfin, sous les traits communs précédemment énoncés, existe, d'un petit bassin à l'autre, *une extrême diversité* des indices, déficits et quotients d'écoulement. Même quand l'altitude moyenne est la même, et la pluviosité équivalente, l'abondance et le régime des eaux peuvent être dissemblables au point qu'il est a priori imprudent de généraliser, sans vérification, à plusieurs bassins proches certaines données acquises en une petite portion d'un autre. La carte des hydrologies saisonnières suivant les principes de KELLER (figure 19 hors-texte), qui laisse pourtant dans l'ombre maints détails de l'écoulement, évoque bien ce kaléidoscope dont la Loire à Gien intègre toutes les diversités. Elle peut mettre aussi en garde contre l'idée d'une unique « province hydrologique » dont le régime moyen du fleuve à Gien, apparemment simple, donne la fausse image.

*
* *

Que la Loire soit, pour l'essentiel, connue de longue date ne doit pas surprendre. Il n'est peut-être pas de fleuve français que ses riverains se soient plus tôt appliqués à maîtriser de quelque façon. Mais, après tant d'efforts et de travaux pour imposer à la réalité du fleuve des altérations croissantes, la Loire reste toujours insoumise et l'homme toujours démuni devant le déchaînement de ses crues et l'amenuisement de ses eaux d'étiage. A une époque où, plus que jamais dans le passé, « l'eau se trouve être la richesse par excellence : plus richesse pour les hommes que la houille ou que l'or », ainsi que l'écrivait déjà Jean Brunhes (1934), alors aussi que le monde contemporain semble, avant tout, occupé de l'exploitation toujours plus efficace, plus complète et plus approfondie des énergies naturelles, l'abondance des eaux de la Loire (26 milliards de m^3 en moyenne annuelle) est en grande partie perdue.

En conclusion de son étude sur la Loire, L. Gallouedec, au début du siècle, plaidait après d'autres en faveur d'aménagements qui auraient rendu au fleuve son rôle de grande artère fluviale pour la stimulation économique des villes riveraines restées à l'écart des mutations du siècle où, précisément, Balzac les avait choisies pour plusieurs scènes de la vie de province. Aujourd'hui, ce qui est attendu de la Loire est en vérité d'une autre ampleur et de nature plus urgente : il s'agit de pourvoir à d'impérieux besoins d'eau à usage domestique, agricole, industriel.

L'accroissement des populations urbaines le long du grand axe ligérien, le développement et l'implantation d'industries grosses utilisatrices d'eau (centrale nucléaire de Dampierre près de Gien, par exemple), la pratique de plus en plus répandue des irrigations par aspersion, font prévoir qu'en vingt ans, les prélèvements pourraient tripler pour l'alimentation en eau potable, doubler pour les besoins industriels, quadrupler voire quintupler pour les irrigations. De 90 à 135 millions de m^3 en 1971 (dont 60 % pour l'irrigation), les consommations nettes cumulées de tout le bassin de la Loire pourraient s'élever à 380 millions de m^3 en 1991 (hypothèse faible) ou à 510 millions de m^3 (hypothèse forte).

Pour compenser ces prélèvements non restitués, assurer une dilution suffisante des rejets polluants et relever les débits estivaux, la Mission Déléguée de Bassin « Loire-Bretagne » estime qu'un débit minimum de 70 m^3/s à Orléans devrait être garanti à moyen terme (cinq à dix ans) et de 100 m^3/s à plus longue échéance (dix à vingt ans). A Nantes, les valeurs correspondantes seraient respectivement de 180 m^3/s et de 240 m^3/s.

Au souci de relever les étiages, s'ajoute la préoccupation, non moins urgente, de protéger les riverains contre les crues. Celles-ci restent menaçantes et seraient d'autant plus dommageables que se multiplient les installations humaines dans les zones inondables et qu'augmente, par conséquent, la valeur des biens à protéger. L'endiguement du fleuve par près de quatre cents kilomètres de levées existantes est efficace, réserve faite de leur entretien, si le débit dans le Val ne dépasse par 6.000 m^3/s. Au delà de ce volume et pour 1976, le montant des dommages directs que provoquerait une crue, telle par exemple que celle de 1856 (8.500 à 9.000 m^3/s au Bec d'Allier) a pu être estimé en francs de 1968 à 381 millions si les digues résistaient et à 1.260 millions si les digues étaient rompues (P. FUNEL et M. SCHWIRTZ, 1968). En 1996, le montant s'élèverait à 566 et 1.870 millions de francs. Or, si les deux autres grandes crues de 1846 et 1866 (environ 9.000 m^3/s) ont sans doute légèrement dépassé au Bec d'Allier celle de 1856, la deuxième crue d'octobre 1907, la plus forte à Gien depuis 1866, n'a pas dû rouler au Bec d'Allier plus de 4.500 m^3/s. En fixant ses objectifs à un débit maximum de pointe de 6.000 m^3/s à Givry, la Mission Déléguée de Bassin « Loire-Bretagne » opte pour la solution qui protège d'une catastrophe nationale (M. BONNEVIOT, 1970).

Relèvement des étiages et protection contre les crues dans ces conditions impliquent des modifications considérables dans le régime naturel du fleuve. Et cette domestication devra porter principalement sur la partie amont du bassin d'où la Loire sort avec ses caractères de plus grande abondance en débit moyen annuel spécifique et de plus grande irrégularité. De Villerest (6.520 km^2) à Gien (35.890 km^2), le module exprimé en $l/s/km^2$ se maintient en effet entre 10,5 et 9,3 et c'est entre

Villerest et Gien que tous les facteurs morphologiques et climatiques se combinent pour donner aux débits extrêmes les plus fortes amplitudes : 11 m³/s à Gien au mois d'août 1949 et à peu près 8.000 m³/s lors des cataclysmes du XIXème siècle.

*
* *

Aujourd'hui, le rêve de débits régularisés, le souci de ce qui n'est pas encore se fait pressant. Tout n'est-il pas devenu possible ? Sans doute, mais à condition que le rêve de faire naître ce qui n'est pas ne cesse pourtant jamais de se laisser guider par ce qui est. Le mathématicien norvégien Abel, cité par Paul Valéry dans un essai célèbre (³), disait au début du XIXème siècle : « On doit donner au problème une forme telle qu'il soit toujours possible de le résoudre ». Cette règle semble particulièrement recommandable quand il est entrepris d'aménager la Loire. L'idée de départ est assurément simple et accordée aux faits : si la cause des excès entre lesquels évoluent les débits est l'absence ou l'insuffisance de réserves naturelles, il faut et il suffit de construire des retenues artificielles. Mais, dès que l'analyse est poussée plus avant — comme elle doit l'être — les projets engendrent des difficultés multipliées pour plusieurs raisons dont les plus graves, du seul point de vue hydrologique, sont les suivantes.

— Tous les aménagements projetés jusqu'à maintenant se heurtent à une principale difficulté : la conciliation des diverses fins poursuivies dans des ouvrages à buts multiples. Contre les crues, la solution proposée consiste à retenir dans des réservoirs le maximum de leur débit de pointe. Pour abaisser de 9.000 m³/s à 6.000 m³/s les flots de crue au Bec d'Allier, il faudrait pouvoir retenir à l'amont de ce point un volume d'un demi-milliard de m³ (I. CHERET, 1967). Pour relever les basses eaux, il faudrait aussi mettre en réserve environ 420 millions de m³ en amont d'Orléans. L'idéal serait évidemment de profiter des « lâchures » pour produire de l'électricité. Enfin, comment les municipalités riveraines de nouveaux plans d'eau n'y verraient-elles pas l'occasion de se donner des aménagements de loisirs aquatiques et nautiques ? Or la poursuite simultanée de toutes ces fins n'est pas réaliste.

— Une seconde difficulté tient au fait que les sites retenus pour l'aménagement de barrages-réservoirs économiquement rentables ne sont pas forcément ceux où les conditions climatiques sont les plus favorables à la retenue des débits.

— Enfin, les multiples ouvrages composant un aménagement régulateur des débits devraient être construits simultanément. Une opération isolée

(³) Regards sur le monde actuel. La Pléiade, T. II, page 952.

risque d'être totalement inefficace. Ce n'est pas ici le lieu d'apprécier la charge financière qui est certainement considérable.

La conciliation des intérêts en jeu est la plus délicate. Pour écrêter efficacement les grandes crues, les barrages doivent être vides au moment où elles surviennent le plus fréquemment c'est-à-dire, pour Gien par exemple, en octobre et en *juin* (cf. les histogrammes de la figure 41, tome II). Mais pour mettre en réserve, en prévision des pénuries estivales, 420 millions de m^3 en amont d'Orléans, les retenues des barrages devraient être pleines en mai et, par conséquent, commencer à se remplir bien avant ce mois puisque, à Villerest par exemple, le débit médian de mai est de 58 m^3/s seulement. La production rentable d'électricité, elle, suppose des réserves maintenues égales et fortes en hiver pour répondre aux demandes de la consommation, maximale en cette saison. L'exemple du barrage de Grangent construit par EDF à fin hydroélectrique a montré son inefficacité totale pour l'amortissement des crues. Enfin, comment concevoir l'aménagement touristique des plans d'eau dont le niveau doit baisser continûment dès le début de l'été en laissant les rives recouvertes de vase ?

Les débats auxquels donne lieu le barrage de Villerest, premier choisi par le ministère de l'Equipement et du Logement pour être inscrit au VIème Plan, montrent combien les divers intérêts sont difficilement conciliables : le projet ne satisfait personne et le concessionnaire n'est pas encore trouvé. Sur une capacité globale de 156 millions de m^3, 27 en seraient réservés pour élever les étiages, ce qui est dérisoire ; une capacité dans la retenue, de 127 millions de m^3, devrait être disponible en permanence pour retenir en quelques heures les eaux des plus grandes crues qui seraient évacuées aussitôt que possible en prévision d'une autre crue éventuelle. La capacité du barrage permettrait sans doute d'écrêter beaucoup d'intumescences moyennes et fortes mais les crues les plus fortes à Villerest sont souvent plus dangereuses à l'amont de cette station qu'à l'aval. En revanche, des crues moyennes à Villerest ne deviennent très dangereuses pour le Val moyen qu'après les apports du Morvan et de l'Allier. Pour l'écrêtement des crues, la localisation de l'ouvrage risque donc de le rendre inopérant. Les huit dixièmes du réservoir devant être normalement vides et la hauteur de chute étant limitée de ce fait, la production d'électricité devient d'un profit problématique : aussi EDF qui ne pourrait tirer du barrage qu'un parti très accessoire se désintéresse du projet. Au surplus, outre que les Roannais verraient disparaître, avec la submersion des gorges voisines, un des lieux favoris de leurs promenades, il n'est pas sûr qu'ils gagneraient à ce prix un plan d'eau pour leurs loisirs puisque la réserve serait en vidange de mai à octobre et surtout que la soudaine arrivée d'une crue pourrait en faire monter très vite le niveau.

Plutôt que quelques grosses retenues lourdes à manier, il semble que

ce qui demande à naître doive être souple, divers, à localisations multiples, et de dimension unitaire modeste ou modérée : il s'agit d'adapter l'équipement du fleuve aux caractères variés et changeants des différentes parties de tout le bassin. Les réserves nombreuses seraient ainsi réparties sur de vastes superficies et leur action d'ensemble pourrait être composée, comme sur un clavier une pièce musicale, à l'exacte mesure des nécessités et des besoins. Car les conditions du climat et de la pluviosité notamment requièrent, pour le bassin de la Loire, un équipement entièrement original dont les fins et l'exploitation sont différentes de celui qui a été construit dans les hautes vallées de la Dordogne toutes proches, et dont la nature doit logiquement l'être aussi. Quant à l'ordre suivant lequel les différents ouvrages devraient être construits, il semble sage de procéder de l'amont vers l'aval en maîtrisant progressivement le fleuve.

L'idée d'un aménagement composite et multiforme commence à prévaloir. Elle n'est d'ailleurs pas nouvelle. Le projet de Comoy (1861) portait sur quelque quatre-vingts sites répartis sur les affluents d'amont. Et A. Renaud (1960-1965), inspirateur du plan défendu par l'A.N.E.C.L.A. depuis 1961. prévoyait aussi une cinquantaine de barrages-réservoirs.

*
* *

Ainsi l'aube naît-elle, peut-être, d'une nouvelle vie pour la Loire qui aura posé tant de problèmes. Ainsi le paradoxe va-t-il peut-être et enfin disparaître de ce fleuve excessif, capricieux et inasservi, descendant à travers des paysages partout modérés, même dans sa partie montagneuse, et dont la « douce plaisance » dans le Val chantait au cœur de nos vieux poètes exilés.

BIBLIOGRAPHIE [1]

ABRARD (R.) — *Géologie régionale du Bassin de Paris.* Payot, **1950**.
— « Notice géologique et hydrogéologique sur le département de la Nièvre ». *Bulletin de l'Institut National d'Hygiène,* **1953,** n° 3, pages 556-602.
— « Etudes géologiques dans et autour de Gien ». *Bulletin du Museum National d'Histoire Naturelle,* **1961,** 2ème série, tome 33, pages 631-636.

ALBINET cf. CAUDRON (M.), ALBINET, COTTEZ (S.) et MARGAT (J.), **1965.**

ANGOT (A.) *Etudes sur le climat de la France, régime des pluies.* Annales du Bureau Central Météorologique de France, tome 1 (mémoires), années **1911 à 1914.**

ARBOS (P.) « La Margeride ». *Mélanges Arbos,* **1963.**

ARCHAMBAULT (M.) *Influence sur les nappes alluviales de l'Allier et de la Loire du projet d'aménagement de Montpezat C.* EDF, Région d'équipement Massif Central II, BURGEAP R 301, octobre **1961.**

ARLERY (R.), GARNIER (M.) et LANGLOIS (R.) *Applications des méthodes de Thornthwaite à l'esquisse d'une description agronomique du climat de la France.* Notice d'instructions techniques. Paris, Météorologie Nationale, octobre **1955.**

ARLERY (R.) « Sur la signification des moyennes de la pluie annuelle à Paris ». *Journal Scientifique de la Météorologie,* juillet-septembre **1959.**

ARLERY (R.), GRISOLLET (H.) et GUILMET (B.) *Climatologie, méthodes et pratiques.* Paris, Gauthier-Villars, **1962.**

ASTIER (J.) « Etude statistique des crues de l'Allier ». *Centre d'Etudes Hydrométéorologiques,* Faculté des Sciences Montpellier, n° 40, **1967.**

AURIAT (S.) « Etude des sondages et captages dans quelques coulées de la chaîne des Puys ». *Rev. des Sc. Nat. Auvergne XXIII,* 3-4, **1957.**

AUVRAY (C.) cf. RODIER (J.) et AUVRAY (C.), **1965.**

BABIN, JOLY et PINOIT « Etude des étiages de l'Allier et de ses affluents ». *EDF, Centre de Recherche et d'Essais de Chatou (CREC) Hyd/* n° 22, **1966.**

BABINET (A.) « Hydrologie, hydrométrie et annonce des crues ». *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées,* **1894.**

---

(1) Les ouvrages cités dans les bibliographies de L. GALLOUEDEC et R. DION ne sont pas repris ici sauf à l'occasion de références précises.

BABINET (A.) et MAILLET (E.) *Bassin de la Loire, notice hydrologique.* Ministère des Travaux Publics, des Transports et de la Marine Marchande, Paris, Imprimerie Nationale, **1919.**

BABONAUX (Y.) *Le lit de la Loire.* Paris, Bibliothèque Nationale, **1970.**

BACHET (M.) « Note sur la propagation et l'annonce des crues ». *Annales des Ponts et Chaussées,* 1er semestre **1934,** pages 409-465.

BACHET et BEAU « Prévision des crues ». *Annales des Ponts et Chaussées,* juillet-août **1940.**

BACHET (M.) « Méthode graphique d'annonce des crues ». *Mémoires et Travaux de la Société Hydrotechnique de France* (SHF), tome II, **1948,** pages 152-159.

BADIN (L.) et MICHEL (R.) « Etude hydrogéologique des nappes alluviales de l'Allier et de la Dore ». *Rev. Sc. Nat. Auvergne,* fasc. 1-2, **1955.**

BALDIT (A.) « Orages, grêles et foudres dans la haute Loire ». *Société des Etudes Locales de la Haute-Loire,* n° 11, Le Puy, **1932.**

BALSEINTE (R.) *Climats montagnards et stations climatiques d'altitude en France.* Paris, Imprimerie Fabre, **1966.**

BALTENBERGER et RECQ « Etude sismique du socle du Val de Loire (Région de La Charité s/Loire) ». *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* Paris, juillet **1965.**

BARATHON (J.J.) « Morphologie de la région des vallées moyennes de la Veyre et de la Monne ». *Revue d'Auvergne,* tome 80, n° 1, **1966,** page 197.

BARBIA (A.) cf. ORIEUX (A.), BARBIA (A.), POUGET (E.) et SABADEL (H.), **1967.**

BARDON (G.) « Hydraulicité et énergie électrique ». *La Météorologie,* **1950,** page 214.

BARRIERE (F.) — cf. PELLECUER (M.) et BARRIERE (F), **1963.**
— *La Loire à Montjean, 1866-1965,* 4ème Circonscription Electrique, Limoges, **1969.**

BAULIEU (R.), MIRONOVITCH (J.) et VIAUT (A.) « Sur l'origine des inondations survenues dans le midi de la France entre le 25 et le 30 septembre 1933 ». *La Météorologie,* septembre **1935,** pages 417-424.

BAULIG (E.) *Le plateau central de la France et sa bordure méditerranéenne.* Paris, Armand Colin, **1928.**

BEAU cf. BACHET et BEAU, **1940.**

BEAUJEU-GARNIER (J.) — *Le Morvan et sa bordure.* Paris, P.U.F., **1950.**
— « Le modelé périglaciaire dans le Massif Central français ». *Revue de Géomorphologie Dynamique,* **1953,** pages 251-281.

BEAUREGARD (J. de) et PARDE (M.) « Quelques remarques sur les crues cévenoles de septembre-octobre 1958 ». *La Houille Blanche,* **1959.**

BEAUREGARD (J. de) — « Caractéristiques hydrologiques de l'année 1961 ». *Annuaire Hydrologique de la France.* Paris, SHF, **1961.**

— « Problèmes de l'eau, l'eau rare, l'eau altérée ». *Comité des Travaux Historiques et Scientifiques - Hydrologie continentale.* Paris, Bibliothèque Nationale, **1969,** pages 11-22.

— « Considérations physiques et humaines en relation avec la prévision des crues ». *Academia nazionale dei Lincei,* anno CCCLXIX, **1972,** n° 169.

— *Grands fleuves français, débits mensuels et annuels ; Fréquences mensuelles des débits français sur quarante ans (1921-1960) ; Débits extrêmes mensuels ; Débits extrêmes journaliers.* EDF, Equipement D.E.P.H., Paris, **1972.**

BEDIOT (G.) *Variabilité des pluies annuelles sur le bassin «Seine-Normandie».* Agence Financière de Bassin Seine-Normandie, Paris, **1967.**

BILLAUT (M.), BIROT (P.), CAVALIER (D.), PEDELABORDE (P.) « Problèmes climatiques sur la bordure nord du monde méditerranéen ». *Annales de Géographie,* **1956.**

BIMBENET « Note sur la cause des inondations de la Loire ». *Journal du Loiret,* 39ème année, n° 138, Orléans, **1856.**

BIROT (P.) cf. — BILLAUT (M.), BIROT (P.), CAVALIER (D.) et PEDELABORDE (P.), **1956.**

— *Précis de géographie physique générale.* Paris, Armand Colin, **1965.**

BLOCH (M.) « La distribution des débits d'un cours d'eau considérée comme somme de deux distributions de Galton ». *La Météorologie,* juillet **1939,** pages 207-219.

BOIS (P.) — « Sur la distribution dans le temps des modules de la Loire à Blois durant un peu plus d'un siècle (1862-1963) ». *Norois,* n° 51, juillet-septembre **1966.**

— *Contribution à l'étude de la variabilité interannuelle des débits des rivières. Recherche des lois de probabilité représentant ces phénomènes.* Thèse Faculté des Sciences, Grenoble, **1968.**

BONNEVIOT (M.) — « L'aménagement de la Loire tel qu'on peut le concevoir en 1970 ». *Etudes Ligériennes* n° 9, **1971**, pages 7 à 40.

BORNOZ cf. DARVES (R.), BORNOZ et KHOBZI (J.), **1969.**

BOUCHET (R.J.) *Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et productivité végétale. L'eau et la production végétale.* I.N.R.A., **1965.**

BOUCHET (R.J.) et ROBELIN (M.) « Evapotranspiration potentielle et réelle ». *Bulletin Technique d'Information, Ministère de l'Agriculture,* n° 238, mars-avril **1969,** pages 215-223.

BOULANGE « Notice sur l'inondation de la Loire des 17 et 18 octobre 1846 ». *Annales des Ponts et Chaussées,* 2ème semestre **1848,** page 325.

BOUT (P.) — « Les formations meubles qui supportent les sols en Haute-Loire ». *Bull. Ass. Fr. Et. Sols,* **1956,** page 535.

— « Enquête géologique et hydrogéologique en Haute-Loire ». *Bull. de l'Institut National d'Hygiène,* tome 13, n° 4, **1958** et tome 14, **1959,** n° 1.

BOYER (J.) cf. REMENIERAS (G.) et BOYER (J.), **1950.**

BRAMARD (A.) — *Climatologie de la région de Moulins.* Moulins, **1934.**
— « La grande crue de l'Allier du 27 octobre 1943 ». *La Météorologie,* **1945,** page 212.

BRETON (L.) *Etude sur le régime des eaux dans le département de la Haute-Loire.* Le Puy, Marchesson, **1912.**

BRIVE (de) « Etude sur l'inondation du 24 septembre 1866 dans la Haute-Loire ». *Annales de la Société d'Agriculture de la Haute-Loire,* tome XXVII, pages 435-449.

BRUCE (J.P.) et CLARK (R.H.) *Introduction to Hydrometeorology.* Toronto, New-York, Paris, Pergamon Press, **1966.**

BRUEL (G.) « Les crues de l'Allier ». *Bull. Soc. Emul. Bourb.,* 26, **1923,** pages 86-87.

BROCHET (P.) et GERBIER (N.) *L'évapotranspiration, aspect agrométéorologique, évaluation pratique.* Monographie n° 65, Météorologie Nationale, **1968.**

BRULEY (E.) *Géographie des pays de la Loire.* Paris, P.U.F., **1937.**

CANARD « Météorologie ancienne, Forez et Lyonnais ». Extraits du *Pays Roannais,* 124 pages, **1958-1959.**

CAPPUS (P.) — « Le calcul des crues. Résultats obtenus sur le terrain expérimental d'Alrance ». *La Houille Blanche,* n° A, **1953.**
— « Etude de l'évapotranspiration sur un bassin de faible étendue ». *Publication n° 38 de l'A.I.H.S.,* tome III, **1954.**
— « Répartition des précipitations sur un bassin versant de faible superficie ». *Comptes rendus et rapports de l'A.I.H.S.,* Toronto, **1957,** pages 515-528.
— « Bassin expérimental d'Alrance ; étude des lois de l'écoulement ; application au calcul et à la prévision des débits ». *La Houille Blanche,* n° A, **1960.**

CARALP (R.) « Le socle cristallin du Massif Central ». *Annales de Géographie,* n° 1, **1965,** page 68.

CAROFF (J.M.) « Rapports sur les situations météorologiques provoquant de fortes précipitations sur le bassin de la Loire et de l'Allier ». *EDF, C.R.E.C. Hyd/* n° 13, 16, 17, 41, **1963, 1964, 1965, 1966.**

CARRIERE (P.) « Le climat pluviométrique de la Cévenne ». *Bulletin de la Société Languedocienne de Géographie,* n° 2, avril-juin, **1966,** pages 271-294.

CASPAR (P.) et DUCLAY (J.) *Bilans hydrologiques pour vingt-sept bassins français.* Monographie n° 49, Météorologie Nationale, **1964.**

CASTANY (G.) *Traité pratique des eaux souterraines.* Paris, Dunod, **1963.**

CAUDRON (M.), ALBINET, COTTEZ (S.) et MARGAT (J.) « Les sources du Loiret. Guide hydrogéologique ». *Bulletin du B.R.G.M.,* n° 3, **1965,** pages 184 à 203.

CAVALIER (D.) cf. BILLAUT (M.), BIROT (P.), CAVALIER (D.) et PEDELABORDE (P.), **1956.**

CHAMPION (M.) *Les inondations en France depuis le VIème siècle jusqu'à nos jours.* 6 volumes (Loire, tomes II et III). Paris, Dunod, **1857 à 1864.**

CHARTIER (M.) — « Sur les coefficients des fonctions exponentielles reliant les débits maxima des crues aux aires des bassins versants ». *Mémoires et Travaux de la S.H.F.*, n° b, **1959.**

— « Initiation à l'étude des crues ». *Information Géographique,* **1960,** pages 56-60.

— « Contribution à l'étude de la sécheresse 1959-1960 ». *Bulletin de l'A.G.F.*, mai-juin **1962.**

— « Précipitations, circulations souterraines, écoulements superficiels dans le Sénonais ». *Bulletin Climatologique de l'Yonne,* **1963-1964.**

— « Le bassin versant hydrologique de l'Orgeval (bassin du Gd. Morin) ». *Bulletin de l'A.G.F.*, n° 346-347, juillet-août **1966 a.**

— « Le cycle hydrologique pseudo-annuel ». *Bulletin climatologique de l'Yonne,* novembre **1966 b.**

— « Recherches géographiques sur des bassins versants ». *Bulletin de l'A.G.F.*, n° 348-349, novembre-décembre **1966 c.**

CHAUVOT (G.) *Pluviométrie et ressources annuelles en eau dans le bassin de l'Arroux.* Etude dactylographiée, Bibliothèque de la Société Hydrotechnique de France, **1968.**

CHERET (I.) *L'eau.* Paris, Ed. du Seuil, **1967.**

COHENDY *Note sur les accidents géologiques et les inondations qui ont été le résultat des pluies continuelles de mai 1856 dans le département du Puy-de-Dôme.* Clermont-Ferrand, **1858.**

COLLIER (D.) « Contribution à l'étude de l'altération des granits et de l'évolution des sols sur les plateaux granitiques de l'Auvergne ». *Bull. Ass. Fr. Et. Sols,* **1951**, pages 1-12.

COMBIER (C.) *Aperçu sur les climats de la Syrie et du Liban.* Beyrouth, **1945.**

COMMERE (R.) *Caractères géographiques de l'arrondissement d'Yssingeaux.* Centre d'Etudes Foréziennes, Saint-Etienne, **1969.**

COMOY (G.) — *Dossier sur les explorations à faire dans les affluents de la Loire supérieure, de l'Allier, du Cher, de l'Indre et de la Vienne.* Archives d'Orléans, 30.887.

— *Relevés graphiques des hauteurs d'eau de la Loire et de ses grands affluents de 1835 à 1856.* Atlas in folio, Paris, **1860.**

— *Relevés graphiques des hauteurs d'eau de la Loire et de ses affluents de 1858 à 1904.*

— *Etudes sur les inondations de la Loire et notes à joindre au rapport.* Paris, **1860-1861.** (BB. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 15060).

— *Renseignements sur les crues de la Loire et de ses grands affluents.* Paris, **1861.** (BB. d'Orléans, fonds P. Guillon).

— « Etude sur la vitesse de propagation des crues de la Loire ». *Rev. Géol.*, tome VII, **1868.**

CONDET (M.) « Note sur la situation des 21 au 24 octobre 1947 sur l'Europe occidentale ». *La Météorologie,* janvier-mars **1949.**

CONTAT (H.), LENOIR (G.) et STRIFFLING (M.) « Note sur les précipitations tombées en Bourgogne le 30 septembre 1965 ». *La Météorologie,* juillet-septembre **1965.**

CORMARY (Y.) *Problèmes de représentation et d'interprétation des débits de basses eaux du bassin de l'Allier.* EDF, C.R.E.C., Montpellier, **1967.**

CORMARY (Y.) et DAUTY (J.) *Etude régionale des ressources en eau, exemple de l'Allier.* EDF, C.R.E.C., **1969.**

CORMARY (Y.) — « Modèles déterministes des relations pluies/débits sur la Sioule ». *Centre d'Etudes Hydrométéorologiques, Hyd/* n° 30, Montpellier, **1969.**

— « Etude des ressources en eau à l'échelle régionale ». *Symposium scientifique international sur l'informatique et les problèmes de l'eau,* Faculté des Sciences de Montpellier, avril **1970.**

COSANDEY (C. M.) *Recherches sur les bilans hydrologiques mensuels.* Thèse de 3ème Cycle, Université de Paris-Sorbonne, **1970.**

COTTEZ (S.) cf. CAUDRON (M.), ALBINET, COTTEZ (S.) et MARGAT (J.), **1965.**

COULET (E.) « Contribution à l'étude morphologique de la Margeride ». *Bull. Soc. Lang. de Géographie,* **1952,** pages 201-334.

COUTAGNE (A.) — « Comment définir et caractériser le degré d'aridité d'une région et sa variation saisonnière ». *La Météorologie,* mars **1935.**

— « De la température qu'il fait, de l'eau qui coule à la neige qui tombe ». *Comptes rendus des travaux de la commission internationale de la neige,* **1938.**

— « L'évaporation du sol et le déficit d'écoulement considérés du point de vue hydrographique, agronomique et climatologique ». *La Météorologie,* **1942** et **1943.**

— « Quelques considérations générales sur la nature, les possibilités et les modalités des prévisions en hydrologie fluviale ». *Annuaire hydrologique de la France,* Paris, S.H.F., **1948.**

— « Etude générale des variations du débit en fonction des facteurs qui les conditionnent ». 1ère partie, *La Houille Blanche,* n° 3, **1948,** page 228 ; 2ème partie, *La Houille Blanche,* n° 5, **1948,** page 416 ; 3ème partie, *La Houille Blanche,* **1949,** page 134.

— « Etude de quelques corrélations hydrométéorologiques régionales et de leur interprétation algébrique ». *Pluie, Evaporation, Filtration, Ecoulement,* La Houille Blanche, Grenoble, **1955.**

CRAMER (H.) *Mathematical Methods of Statistics.* Princeton University Press, 9ème édition, **1961.**

CURE (P.) « La nouvelle classification des climats de Thornthwaite ». *La Météorologie,* avril-juin **1950,** pages 99-106.

DACHARRY (M.) — « Précipitations et écoulements sur le bassin supérieur de l'Allier ». *Norois,* n° 51, **1966,** pages 331-344.

— « Quelques remarques sur les parts respectives de la Loire et de l'Allier dans les débits de crues à Gien de 1955 à 1967 ». *Bulletin de la Section de Géographie, Comité des Travaux Historiques et Scientifiques,* tome LXXX, Paris, BB. Nationale, **1969.**

— « Quelques résultats de recherches statistiques et géographiques sur l'adoption d'une année hydrologique dans le bassin de l'Ance du Nord ». *Bulletin de l'A.G.F.,* n° 387-388, **1971.**

DARVES (R.), BORNOZ et KHOBZI (J.) « Evapotranspiration potentielle, déficits hydriques et besoins en eau d'irrigation en France ». *Bull. Sec. Géog., Comité des Travaux Historiques et Scientifiques,* tome LXXX, Paris, BB. Nationale, **1969.**

DAVY (L.) « Les gardons, étude hydrologique ». *Bull. Soc. Lang. Géog.,* XXVII, **1956,** pages 99 - 233.

DEFFONTAINES (J. P.) *Carte schématique des pentes en France.* Ministère de l'Agriculture, S.E.I., n° 34, janvier **1968.**

DEGLAUDE — « Les crues de la Loire ». *Annales des Ponts et Chaussées,* 1er semestre **1873,** page 277.

— « La Loire à Orléans, Régime d'hiver et d'été, Discussions des observations hydrologiques depuis 1830 et pluviométriques depuis 1862 ». *Annales des Ponts et Chaussées,* 1er semestre **1875,** pages 457-480.

— *Tableaux graphiques d'ensemble des hauteurs de pluies et des hauteurs des rivières,* 1862-1893. Archives du Loiret, fonds des Ponts et Chaussées, 30901.

DELANNOY (H.) cf. PEDELABORDE (P.) et DELANNOY (H.), **1958.**

DERRUAU (M.) — *La grande Limagne auvergnate et bourbonnaise.* Clermont-Ferrand, Imprimerie Delannoy, **1949.**

— *Les caractères différentiels des roches du socle dans l'ouest et le sud-ouest du Massif Central français.* Clermont-Ferrand, **1952.**

— *Précis de morphologie.* Paris, Masson, **1958.**

DESPREZ (N.) et MEGNIEN (C.) « Connaissances nouvelles sur la structure de la Beauce ». *Bulletin du B.R.G.M.,* **1965,** pages 303-308.

DESPREZ (N.) *Notice de la carte géologique de la France au 1/50.000 : Châteauneuf s/Loire.* B.R.G.M., **1971.**

DIENERT (F.) et ETRILLARD (P.) *Etude des eaux des alluvions de la vallée de la Loire et des plateaux environnants.* Préfecture de la Seine, Ville de Paris, Paris, **1913,** pages 205-482.

DIENERT (F.) — *Rapport sur les études des adductions nouvelles.* Paris, Chaix, **1913.**

— « Nouvelle étude relative aux expériences effectuées en 1920 sur la nappe de Loire ». *Annales des services techniques d'Hygiène de la Ville de Paris,* tome VII, **1926** et tome VIII, **1927.** Paris, Gauthier-Villars.

— « Etude hydrogéologique des eaux circulant à travers les alluvions (vallée de la Loire) ». *Bull. Serv. carte géologique de la France,* n° 168, **1927-1928,** pages 165-199.

DINGEN (P.) et STEYAERT (H.) — « A truncated square-root-normal distribution applied to monthly precipitation totals for Ghent ». *Bulletin de l'A.I.H.S.*, n° 2, **1971.**
— Distribution for k-day rainfall totals. *Bulletin de l'A.I.S.H.*, n° 3, **1971.**

DION (R.) — *Le Val de Loire.* Tours, Arrault, **1934.**
— *Histoire des levées de la Loire.* Paris, **1961.**

DOSSEUR (H.) *Contribution à la définition de caractéristiques d'état du bassin expérimental d'Alrance pour la prévision hydrologique.* Thèse de 3ème Cycle, Faculté des Sciences de Montpellier, EDF C.R.E.C., **1964.**

DUBAND (D.) — cf. LUGIEZ (F.), DUBAND (D.), GUILLOT (P.) et PLANCHER (C.), **1964.**
— cf. GUILLOT (P.) et DUBAND (D.), **1968.**

DUCLAY (J.) cf. CASPAR (P.) et DUCLAY (J.), **1964.**

ESTIENNE (P.) — *Recherches sur le climat du Massif Central français.* Mémorial de la Météorologie Nationale, n° 43. Paris, **1956.**
— « A propos de la classification des régimes fluviaux ». *Mélanges Pardé,* Gap, Ophrys, **1968,** pages 181-184.

ETRILLARD (P.) cf. DIENERT (F.) et ETRILLARD (P.), **1913.**

FANDEUX (D.) — « Etude statistique des crues de la Loire à Givry-Fourchambault connaissant les débits amont à Roanne et à Vieille-Brioude ». *EDF, C.R.E.C. Hyd/* n° 7, **1966.**
— « Recherches des débits moyens mensuels et annuels de probabilités données aux différentes stations de jaugeage du bassin de l'Allier ». *EDF, C.R.E.C. Hyd/* n° 30, **1966.**
— « Ajustements des débits moyens mensuels et annuels des stations hydrométriques de l'Allier à la loi de Galton ». *EDF, C.R.E.C. Hyd/* n° 6, **1967.**
— « Recherche des débits moyens mensuels et annuels de probabilités données aux stations hydrométriques à relevé court de l'Allier ». *EDF, C.R.E.C. Hyd/* n° 37, **1967.**

FANTOLI (A.) « La normalité et la variabilité des séries pluviométriques centenaires en Italie ». *Publication de l'A.I.H.S.*, n° 36, **1954,** pages 355-373.

FEL (A.) — « Le climat agricole et les limites altitudinales de l'occupation du sol dans le Massif Central ». *Annales de Géographie,* **1955,** pages 401-412.
— *Les hautes terres du Massif Central.* Paris, P.U.F., **1962.**

FONTAINE (P.) — « Les gouttes d'air froid ». *La Météorologie,* avril-juin **1951.**
— « Contribution de la Météorologie au problème de l'annonce des crues et de leur comportement ». *La Météorologie,* janvier-mars **1955.**
— « Analyse de la situation météorologique à l'origine des crues des 3 et 4 octobre 1960 dans le nord-ouest du Massif Central ». *La Météorologie,* janvier-mars **1962.**
— *Considérations sur le bilan hydrologique ; bassins fluviaux de moyenne importance.* Monographie n° 37 de la Météorologie Nationale, Paris, **1964.**

— « Note succincte sur les pluies du 30 septembre 1965 en Bourgogne ». *Mélanges Pardé,* Gap, Ophrys, **1968,** pages 193-200.
— *Quelques applications particulières du bilan hydrologique.* Monographie n° 67 de la Météorologie Nationale, Paris, **1969.**

FONTAINE (P.) et PORTELA (C.) « Les causes météorologiques des grandes crues cévenoles au début de l'automne 1958 ». *La Météorologie,* n° 53, janvier-mars **1959.**

FOURGEOT (C.) « De la grenouille à l'ordinateur 6400 ». *Control Data France,* novembre **1970.**

FOURNIER (F.) *Climat et érosion.* Paris, P.U.F., **1960.**

FRECAUT (R.) et PARDE (M.) « Hydrologie fluviale de l'Europe continentale, régions boisées et hydrologie fluviale ». *Rev. Géog. de l'Est,* tome 2, **1962.**

FRECAUT (R.) — *Eléments d'hydrologie continentale,* Paris, C.D.U., **1964.**
— « Les facteurs hydrométéorologiques directs des étiages de saison chaude en milieu tempéré océanique ». *Bull. Sec. Géog., Comité des Travaux Historiques et Scientifiques,* tome LXXX, Paris, BB. Nationale, **1969,** pages 195-216.
— *La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviale en milieu tempéré océanique.* Thèse de doctorat d'Etat, publication de Lille III, **1972.**

FREMONT (G.) « Etude des corrélations entre pluviosités de quatre régions du bassin de l'Allier (1958-1963) ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 17, **1966.**

FREY (J.) « Etude des débits d'étiages en trois stations du bassin de l'Allier ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 28, **1966.**

FUNEL (P.) et SCHWIRTZ (M.) « Etude économique de la protection des vals de Loire par barrages écrêteurs de crues ». *Xèmes journées de l'Hydraulique (1968),* question IV, rapport 7, Paris, S.H.F., **1969.**

GACHON (L.) — « Les inversions de température entre plaines et montagnes d'Auvergne ». *Et. Rhod.,* **1935,** pages 19-74.
— *Les Limagnes du Sud et leurs bordures montagneuses.* Tours, Arrault, **1939.**
— « L'influence, en Auvergne, de l'orientation nord comparée à l'orientation sud ». *Rev. Géogr. Alp.,* **1944,** pages 555-562.
— « Les variétés régionales du climat dans le Massif Central et le vrai Massif Central climatique ». *Et. Rhod.,* **1946.**
— *L'eau domestiquée.* Le Puy, L'Eveil, **1962.**
— « Août, septembre, octobre 1958 : le temps qu'il a fait et le temps annoncé par la Météo nationale ». *Bulletin Historique et Scientifique de l'Auvergne,* 4ème trimestre **1968.**

GALLOUEDEC (L.) *La Loire, étude de fleuve.* Paris, Hachette, **1910.**

GARNIER (M.) — cf. ARLERY (R.), GARNIER (M.) et LANGLOIS (R.), **1955.**

— *Climatologie de la France, sélection de données statistiques.* Mémorial n° 50 de la Météorologie Nationale, Paris, **1967.**

GARRIGOU-LAGRANGE *Revue L'Arbre et l'Eau,* juin **1907, 1908** et juillet **1909,** Limoges.

GENESLAY (E.) *La Loire, crues et embâcles.* Paris, Nouvelles Editions Latines, **1972.**

GENTILLI (J.) « Une critique de la méthode de Thornthwaite pour la classification des climats ». *Annales de Géographie,* mai-juin **1953.**

GERBIER (N.) cf. BROCHET (P.) et GERBIER (N.), **1968.**

GIBERT (E.) cf. PARDE (M.) et GIBERT (E.), **1951.**

GIGNOUX (M.) *Géologie stratigraphique.* Paris, Masson, **1950.**

GILLY (S.) « Le bassin du Gapeau ; problèmes d'équipement et d'organisation ». *Bull. Sec. Géogr., Comité des Travaux Historiques et Scientifiques,* tome LXXX, Paris, BB. Nationale, **1969,** p. 217-233.

GRAEFF (M.) — *Traité d'hydraulique.* Paris, **1856.**
— Dossier in 4° sur les procédés de calcul à employer pour jaugeages de la Loire. Orléans, **1860.** Bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées 18001 .
C 945

GRAS (J.) — *Le bassin de Paris méridional, étude morphologique.* Rennes, Imprimeries Réunies, **1963.**
— « La 49ème excursion géographique interuniversitaire, mai 1966 », *Annales de Géographie,* mars-avril **1968.**

GRICOURT-MAGNIEN (R.) « Rapport sur la dérivation des eaux des vals de Loire pour l'alimentation de la région parisienne ». *Bulletin trimestriel de la Chambre de Commerce de Nevers,* avril-juin **1922,** pages 29-46.

GRISOLLET (H.) cf. ARLERY (A.), GRISOLLET (H.) et GUILMET (B.), **1962.**

GUEHOT (J.) « Existence et rôle des couches d'instabilité supérieure ». *La Météorologie,* juillet-septembre **1947.**

GUILCHER (A.) — « Hydrologie ». *Bulletin de la Société des Professeurs d'Histoire et de Géographie,* n° 154, **1958.**
— *Précis d'hydrologie.* Paris, Masson, **1965.**

GUILLOT (P.) — cf. LUGIEZ (F.), PLANCHER (C.), GUILLOT (P.) et DUBAND (D.), **1964.**
— cf. LUGIEZ (F.) et GUILLOT (P.), **1968.**

GUILLOT (P.) et DUBAND (D.) — *La méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies.* S.H.F., **1968.**
— « Estimation des valeurs extrêmes de crues à partir des précipitations ». *Mélanges Pardé,* Gap, Ophrys, **1968,** pages 263-293.

GUILLOT (P.) *La prévision hydrologique.* EDF, DTG, Grenoble, **1969.**

HALL (R.) « Base Flow Recessions ». *Water Resources Research,* octobre **1968,** pages 972-983.

HALLAIRE (M.) « La sécheresse de l'année 1959 dans la moitié nord de la France ». *La Météorologie,* **1960,** pages 289-301.

HALPHEN (E.) « Sur l'hydrologie statistique, Inventaire des sources d'erreurs en hydrologie statistique ». *Pluie, Evaporation, Filtration, Ecoulement,* La Houille Blanche, Grenoble, **1955.**

HEBRAIL (J.) *Etude des propagations des crues sur l'Allier.* Centre d'études hydrométéorologique. Faculté des Sciences de Montpellier, n° 50, **1967.**

HERGUEZ (C.) *Etude analytique des eaux de rivières de la région Rhône-Alpes.* Thèse Institut Pasteur, Lyon, **1965.**

HIRSCH (F.) — cf. TRICARD (J.) et HIRSCH (F.), **1960.**
— « Analyse morphométrique des réseaux fluviatiles, Application à la prévision des cours d'eau ». *Rev. Géom. Dyn.* 3, **1962,** pages 97-106.
— « Estimation de débits des cours d'eau ». *Bulletin de l'A.I.H.S.* n° 4, **1963.**
— « Application de l'analyse statistique à l'échelle de la pluviométrie (bassin de la Bruche) ». *La Météorologie,* **1966.**

HLAVEK (R.) — « Les recherches hydrologiques dans le cadre de la Direction Générale de l'Espace Rural ». *Mélanges Pardé,* Gap, Ophrys, **1968.**
— cf. TURC (L.), GOBILLOT (T.), HLAVEK (R.) et LECARPENTIER (M.), **1963.**

HUNAULT de LA PELTRIE *Sur quelques unes des causes des inondations de la Loire et sur quelques uns des moyens à employer pour les combattre et les prévenir.* Angers, **1857.**

IMBART de LA TOUR (J.) *La Loire, étude générale et étude spéciale de ce fleuve en Nivernais.* Nevers, **1900.**

INDRI (E.) « Corrélations annuelles précipitations/débits pour les cours d'eau du bassin de la Piave (1928-1951) ». *Pluie, Evaporation, Ecoulement, Filtration,* La Houille Blanche, **1955.**

ISNARD (H.) « Note sur les dépressions liguriennes d'hiver ». *Méditerranée,* n° 4, **1968.**

JACQUET (J.) « Répartition spatiale des précipitations à l'échelle fine et précision des mesures pluviométriques ». *Publication de l'A.I.H.S.,* n° 53, **1960.**

JACQUET (J.) et BERNIER (J.) « Détermination du débit maximum de crue et de sa probabilité de dépassement dans le cas d'information incomplète ». Colloque international sur les crues. Léningrad, 1967. *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 8, **1967.**

JALU (R.) « Les précipitations anormales de fin décembre 1957 sur le sud-est de la France ». *La Météorologie,* janvier-mars **1958.**

JOLLOIS (M.) « Mémoire sur les crues de la Loire supérieure ». *Annales des Ponts et Chaussées,* mars **1881,** pages 273-322.

JOLY cf. BABIN, JOLY et PINOIT, **1966.**

JOLY (F.) « Etude des indices de Thornthwaite pour quelques stations du Maroc ». *Ann. du Serv. de phys. du Globe et Météor. de l'Institut Scientifique chérifien,* tome XVIII, **1958**, pages 119-128.

KELLER (R.) « Die Regime der Flüsse der Erde ». Besicht der I.G.U. Commission on the International Hydrological Decade « Run-off Regimens and Studies of the Water Balance ». *Freiburger geographische Hefte,* Heft 6, **1968.**

KENDALL (C.R.) The Cube-root Normal Distribution Applied to Canadian Monthly Rainfall Totals. *Publication de l'A.I.H.S.,* n° 53, **1960**, pages 250-260.

KHOBZI (J.) cf. DARVES (R.), BORNOZ et KHOBZI (J.), **1969.**

KOCH *Alimentation en eau des agglomérations.* Paris, Dunod, **1960.**

KOHLER (M.A.) cf. LINSLEY, KOHLER et PAULHUS, **1958.**

KOHLER (M.A.) et RICHARDS (M.M.) « Multicapacity Basin accounting for Predicting Run-off from Storm Precipitation ». *Journal of Geophysical Research,* n° 67, décembre **1962.**

LABASSE (J.) *L'organisation de l'espace.* Paris, Hermann, **1966.**

LACHIVER (M.) « Les régimes fluviaux ». *Inf. Geog.,* n° 4 et 5, **1963.**

LANGLOIS (R.) cf. ARLERY (R.), GARNIER (M.) et LANGLOIS (R.), **1955.**

LARRAS (J.) *Prévision et prédétermination des étiages et des crues.* Paris, Eyrolles, **1972.**

LASLOFFY (W.) « Examen des basses eaux ». Compte rendu du congrès d'Helsinki, *Publication de l'A.I.H.S.,* **1960,** pages 132-139.

LEBLANC (P.) « Les inondations de l'Allier dans l'arrondissement de Brioude ». *Annales de la Société d'Agriculture, Sciences, Arts et Commerce du Puy,* **1872 à 1875.**

LE CAM (L.) et MORLAT (G.) « Les lois des débits des rivières françaises ». *La Houille Blanche,* n° B, **1949.**

LECARPENTIER (M.) et MONNEY (M.) *Aménagement hydraulique du bassin de la Loire ; Besoin en eau d'irrigation.* Ministère de l'Agriculture, Direction générale du Génie Rural, Paris, **1961.**

LECARPENTIER (M.) cf. TURC (L.), GOBILLOT (T.), HLAVEK (R.) et LECARPENTIER (M.), **1963.**

LE GALL (A.) « Les types de temps du sud-ouest de la France ». *La Météorologie,* **1934,** pages 307-408.

LENOIR (G.) cf. CONTAT (H.), LENOIR (G.) et STRIFFLING (M.), **1965.**

LINSLEY, KOHLER et PAULHUS *Hydrology for Engineers.* Mc. Graw Hill Book Co. New-York, **1958.**

LIORZOU (A.) *Initiation pratique à la statistique.* Paris, Gauthier-Villars, **1961.**

LOUP (J.) *L'Oum er Rebia, contribution à l'étude hydrologique d'un fleuve marocain.* Travaux de l'Institut Scientifique Chérifien, Rabat, **1960.**

LUGIEZ (F.), DUBAN (D.), GUILLOT (P.) et PLANCHER (C.) « La capacité de rétention du sol, problème majeur pour la prévision des débits à court terme d'après les averses ». *Publication n° 63 de l'A.I.H.S.*, **1964.**

LUGIEZ (F.) et GUILLOT (P.) « La prévision des débits et des crues dans les services d'exploitation d'EDF ». *S.H.F.*, **1968.**

MAGRIN (J.) « Remarques sur quelques relations entre les pluies et les écoulements sur le bassin versant de l'usine de Marèges sur la Dordogne ». *Pluie, Evaporation, Filtration et Ecoulement,* La Houille Blanche, **1955.**

MAILLET (E.) — *Essai d'hydraulique fluviale.* Paris, Hermann, **1905.**
— cf. BABINET (A.) et MAILLET (E.), **1919.**

MAITRE (C.) et TRAUTMANN (J.) *Etude hydrogéomorphologique comparée de cinq bassins versants de l'Allier.* Thèse de 3ème cycle de géographie, Strasbourg, **1968.**

MANTELLIER (M.) *Histoire de la communauté des marchands fréquentant la rivière de Loire et fleuves descendant en icelle.* Orléans, **1867-1869.**

MARGAT (J.) cf. CAUDRON (M.), ALBINET, COTTEZ (S.) et MARGAT (J.), **1965.**

MARKOVIC (R. D.) « Probability Functions of Best Fit to Distribution of Annual Precipitation and Run-off ». *Hydrology Papers,* Fort Collins, **1963,** n° 1.

MARTONNE (E. de) *Géographie physique de la France.* Paris, Armand Colin, **1942.**

MASSE (P.) « Situation, perspectives et applications de l'hydrologie statistique ». *Annuaire hydrologique de la France, S.H.F.*, **1940.**

MASSON (M.) — « Classement a priori des bassins versants du haut Allier en fonction de leur aptitude au ruissellement ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 33, **1966.**
— « Analyse des relations globales pluies/débits à Grandrieu par corrélations multiples ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 47, **1967.**
— « Appréciation et variation de l'évapotranspiration potentielle sur le bassin versant de l'Allier ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 60, **1967.**
— « Analyse de quelques crues de l'Allier et de ses affluents, théorie de l'hydrogramme unitaire ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 10, **1968.**
— « Interaction hydrologie-informatique, leçon de l'expérience Allier ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 15, **1968.**

MAZOYER « Note sur le Service de la Prévision des Crues dans la Loire centrale ». *Annales des Ponts et Chaussées,* 2ème trimestre **1890,** pages 441-511.

MEGNIEN (C.) — *Observations hydrogéologiques sur le sud-est du bassin de Paris.* B.R.G.M., **1964.**
— cf. DESPREZ (N.) et MEGNIEN (C.), **1965.**

MERAVILLE (D.) « Le haut pays du Cézallier ». *Revue d'Auvergne,* tome 80, **1966,** pages 29-44.

MEYNIER (A.) — *Segala, Levezou, Châtaigneraie.* Aurillac, **1931.**
— « Remarques sur le régime des rivières cantaliennes ». *Revue de Haute Auvergne,* XXI, **1946,** Clermont-Ferrand.

MICHEL (R.) — cf. BADIN (L.) et MICHEL (R.), **1955.**
— « Notice géologique et hydrologique sur le département du Puy-de-Dôme ». *Bull. de l'Int. Nat. d'Hygiène,* tome 13, n° 2, avril-juin **1958.**

MIFSUD (C.) « Le problème de l'eau, Calcul de l'évapotranspiration en Beauce ». *Etudes Ligériennes,* n° 8, octobre-décembre **1970.**

MIGNON (C.) « La vallée de la Couze Pavin de Perrier à Saurier ». *Revue d'Auvergne,* tome 80, n° 1, **1966.**

MIRONOVITCH (J.) et VIAUT (A.) — « Un cumulo-nimbus observé d'un avion ». *La Météorologie,* octobre **1935,** page 436.
— cf. BAULIEU (R.), MIRONOVITCH (J.) et VIAUT (A), **1935.**

MITARD (A.) « Pluviosité de la bordure sud-orientale du Massif Central ». *Revue de Géographie Alpine,* **1927.**

MONNEY (M.) cf. LECARPENTIER (M.) et MONNEY (M.), **1961.**

MONNIER (L.) *L'épopée de la Loire navigable (1892-1922),* 27 pages dactylographiées. s.l.n.d. **1963 ?**

MORLAT (G.) — cf. LE CAM (L.) et MORLAT (G.), **1949.**
— « Note sur l'estimation des débits de crues ». *La Houille Blanche,* n° spécial B, **1951.**

MORAND (F.) « Critères de choix et projets d'équipement d'un petit bassin versant pour l'étude des relations sol-forêts-eau ». *Bulletin de l'A.G.F.,* n° 348-349, novembre-décembre **1966.**

MUSSET (R.) « Les calculs relatifs aux régimes pluviométriques ». *Etudes Rhodaniennes,* **1935.**

NITARD (J.) — « Etude du régime thermique du bassin versant de l'Allier ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 62, **1967.**
— *Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin versant du moyen Allier.* Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences de Montpellier, **1968.**

NORVATOV « L'écoulement minimum des petits fleuves du territoire européen de l'U.R.S.S. ». *Travaux de l'Institut Hydrologique d'Etat,* fascicule n° 52, **1956,** page 42.

ONDE (H.) « Les crues de l'Allier ». *Revue de Géographie Alpine,* **1923,** pages 301-373.

ORIEUX (A.), BARBIA (A.), POUGET (E.) et SABADEL (H.) *Méthode d'évaluation d'un bilan hydrologique ; application au bassin de la Cèze.* Monographie de la Météorologie Nationale, n° 60, **1967.**

PARDE (M.) — « Les phénomènes torrentiels sur le rebord oriental du Massif Central ». *Rev. Géog. Alp.,* tome VII, **1919,** pages 1-200.
— *Le régime du Rhône,* 2 volumes. Lyon, **1925.**
— « La crue catastrophique de mars 1930 dans le sud-ouest de la France ». *Rev. Géog. Alp.,* **1930,** pages 343-393.
— « La crue de mars 1930 dans le sud-ouest de la France, Genèse de la catastrophe ». *Rev. Géog. des Pyrénées et du Sud-Ouest,* **1930,** pages 363-459.
— « L'abondance des cours d'eau ». *Mélanges Blanchard,* Grenoble **1932.**
— *Fleuves et Rivières,* 1ère édition. Paris, A. Colin, **1933.**
— « Les crues de décembre 1932 dans le Languedoc et le Roussillon ». *Rev. Géog. des Pyr. et du S.O.,* n° 4, **1933,** pages 449-513.
— « Intempéries méditerranéennes récentes en France ». *Rev. Géog. Alp.,* n° 3, **1934,** pages 675-703.
— « Crues méditerranéennes de septembre et d'octobre 1933 ». *Rev. Géog. des Pyr. et du S.O.,* n° 3, **1934,** pages 328-336.
— « Le régime de la Garonne ». *Rev. Géog. des Pyr. et du S.O.,* n° 2 et 3, **1935,** pages 105-262.
— « Les crues de la Garonne en 1935 et au début de 1936 ». *Rev. Géog. des Pyr. et du S.O.,* **1936,** pages 206-211.
— « Inondations en France en 1935 et 1936 ». *Annales de Géographie,* **1937,** pages 113-123.
— « La formidable crue d'octobre 1940 dans les Pyrénées Orientales ». *Rev. Géog. des Pyr. et du S.O.,* n° 3, **1941,** pages 237-279.
— « Quelques nouveautés sur le régime du Rhône ». *Et. Rhod. Lyon,* **1942.**
— *Cours de potamologie,* 2 volumes. Grenoble, **1949.**
— « Les facteurs géographiques du bilan annuel de l'écoulement ». *Revue d'hydrologie,* n° 5, 6, 7 et 8, **1949,** Budapest.
— « Quelques effets modérateurs de la nature du sol sur les régimes fluviaux ». *Rev. Géog. Alp.,* **1950,** pages 279-289.
— « Influence de la couverture nivale sur le ruissellement et spécialement sur les inondations ». *Union géodésique et géophysique internationale (1948),* tome II, rapport n° 20, Oslo, **1950.**

PARDE (M.) et SANSON (J.) cf. SANSON (J.), **1951.**

PARDE (M.) et GIBERT (E.) « Régime du cours inférieur de la Loire ». *La Houille Blanche,* n° A, **1951.**

PARDE (M.) — « Le régime des rivières du Massif Central depuis le début du siècle ». *Mélanges Arbos,* Clermont-Ferrand, **1953.**
— « Sur les inondations en Aquitaine, spécialement dans le bassin de la Garonne à propos de la grande crue de février 1952 ». *Rev. Géog. des Pyr. et du S.O.,* **1953** et **1954.**
— « Les abaques de M. Wundt pour évaluer les débits moyens annuels des rivières d'après les précipitations et les températures ». *Annales de Géographie,* **1954,** pages 52-56.
— « Etudes sur l'hydrologie des rivières de la Forêt Noire ». *Annales de Géographie,* **1954,** pages 130-134.
— « Sur les crues pluviales non régulières de saison chaude dans les

régions non tropicales ». *Publication de l'A.I.H.S.*, n° 38, **1955,** pages 340-440.

— « Données numériques relatives aux bilans de l'écoulement c'est-à-dire surtout au ruissellement lors des crues ». *La Houille Blanche,* Grenoble, **1955.**

— « Sur quelques rivières d'une abondance spécifique énorme ». *Publication de l'A.I.H.S.*, n° 38, **1956,** pages 184-190.

— « Les crues survenues en France de 1951 à 1955 ». *Publication de l'A.I.H.S.*, n° 42, **1956,** pages 207-221.

— « Etiages surabondants de quelques rivières ». Compte rendu de l'Assemblée de Toronto. *Publication de l'A.I.H.S.*, **1958,** pages 106-113.

— « Crues récentes de saison chaude sur la Seine et la Saône ». *Annales de Géographie,* **1958,** pages 343-345.

PARDE (M.) et BEAUREGARD (J. de) cf. BEAUREGARD (J. de), **1959.**

PARDE (M.) et CHARTIER (M.) « Les crues ». *Information Géographique,* n° 2, **1960,** pages 60-67.

PARDE (M.) et FRECAUT (R.) cf. FRECAUT (R.), **1962.**

PARDE (M.) — « La crue exceptionnelle d'octobre 1960 dans l'ouest du Massif Central ». *Annales de Géographie,* n° 2, **1962,** pages 36-63.

— « Quelques remarques sur les crues cévenoles ». *Congrès des Sociétés Savantes,* Paris, Imprimerie Nationale, **1962,** pages 239-264.

— « Les crues cévenoles catastrophiques du dernier demi-siècle et de septembre-octobre 1958 ». *Annales de Géographie,* **1963,** pages 472-477.

— *Sur la puissance des crues en diverses parties du monde.* Géographica, Saragosse, **1963.**

— *Fleuves et Rivières,* 4ème édition. Paris, A. Colin, **1964 a.**

— « Etudes potamologiques sur la Loire et ses affluents ». *Norois,* Poitiers, **1964 b.**

— « Quelques données sur les crues remarquables en diverses contrées et sur les bilans de leurs écoulements ». *Revue de l'Union Internationale de Secours,* Genève, **1964 c.**

— « Intérêt d'études hydrologiques approfondies sur des bassins expérimentaux occupant plusieurs milliers de kilomètres carrés ». *Publication de l'A.I.H.S.*, volume 4, **1965,** pages 13-19.

— « L'hydrologie fluviale ». *Géographie Générale, encyclopédie de la Pléiade.* Paris, Gallimard, **1966,** pages 87-158.

— « Sur un très grand hydrologue récemment disparu : Aimé Coutagne ». *Rev. Géog. Alp.*, n° 3, **1971,** pages 363-370.

PAUL (P.) *Contribution à l'étude du climat du Velay et du haut Vivarais.* Monographie n° 69, Météorologie Nationale, Paris, **1969.**

PAULHUS cf. LINSLEY, KOHLER et PAULHUS, **1958.**

PEDELABORDE (P.) — « Un exemple de circulation atmosphérique régionale, la circulation sur l'Europe occidentale ». *Annales de Géographie,* **1953,** pages 401-417.

— cf. BILLAUT (M.), BIROT (P.), CAVALIER (D.) et PEDELABORDE (P.), **1956.**

— *Le climat du Bassin Parisien.* Paris, Génin, **1957 a.**

— « Le climat du Massif Central Français, d'après la thèse de P. Estienne ». *Rev. Géog. des Pyr. et du S.O.*, **1957 b,** pages 389-399.

PEDELABORDE (P.) et DELANNOY (H.) « Recherches sur les types de temps et les mécanismes des pluies en Algérie ». *Annales de Géographie,* **1958.**

PEDELABORDE (P.) — *La circulation atmosphérique sur les Pyrénées françaises.* Paris, C.D.U., **1959.**

— « Remarques sur les variations de volume des précipitations ». *Mélanges Pardé,* Gap, Ophrys, **1968 a.**

— « Les bilans hydriques ». *Cahiers de Géographie de Québec,* n° spécial Climatologie, avril **1968 b.**

— *Introduction à l'étude scientifique du climat.* Paris, S.E.D.E.S., **1970.**

PEGUY (C. P.) — « L'hydrologie fluviale ». *Bulletin de la Société des Professeurs d'Histoire et de Géographie,* n° 137, janvier **1954,** pages 158-162.

— *Eléments de statistiques appliquées aux sciences géographiques.* Paris, S.E.D.E.S., **1958.**

— *Précis de Climatologie.* Paris, Masson, **1961.**

— « Quelques réflexions sur la signification des régimes pluviométriques moyens d'inégales durées de références ». *Mélanges Pardé,* Gap, Ophrys, **1968,** pages 505-515.

PELLECUER (M.) et BARRIERE (F.) *Les étiages de la Loire en aval du Bec d'Allier.* S.H.F., 25 octobre **1963.**

PENMAN (H. L.) « National Evaporation From Open Water, Bare Soil and Grass ». *Proc. Roy. Soc.,* tome 193, Londres, **1948.**

PERPILLOU (A.) — *Le Limousin, étude de géographie physique régionale.* Paris, Hachette, **1940.**

— « Les pluies et l'alimentation des sources en terrain cristallin ». *Annales de Géographie,* **1945,** pages 209-214.

PIATIER (A.) *Statistique descriptive et initiation à l'analyse.* Paris, P.U.F., Thémis, **1962.**

PINARD (J.) — *Les précipitations et les types de temps à l'origine de crues dans le nord-ouest du Massif Central (1953-1962).* Monographie n° 42 de la Météorologie Nationale. Paris, **1965.**

— « Le bassin de la Vienne, ses débits et ses crues ». *Norois,* **1966,** pages 371-381.

PINOIT cf. BABIN, JOLY et PINOIT, **1966.**

PLANCHER (C.) cf. LUGIEZ (F.), DUBAN (D.), GUILLOT (P.) et PLANCHER (C.), **1964.**

PLOTNIKOV (N. A.) *Ressources en eaux souterraines.* Paris, Gauthier-Villars, **1962.**

PORTELA (C.) cf. FONTAINE (P.) et PORTELA (C), **1959.**

POUGET (E.) cf. ORIEUX (A.), BARBIA (A.), POUGET (E) et SABADEL (H.), **1967.**

POUQUET (M. J.) « Mouvements de l'eau dans les couches superficielles du sol ». *Bulletin A.G.F.,* mai-juin **1965,** pages 69-77.

POURSIN (G.) « L'histoire du climat dans la Nièvre du XVè au XVIIIè siècle ». *Acta Geographica,* n° 9, **1972.**

QUENEY (P.) « Les mouvements de l'atmosphère ». *Géophysique, encyclopédie de la Pleiade.* Paris, Gallimard, **1971,** pages 554-634.

RAULIN (V.) *Observations pluviométriques faites dans la France méridionale de 1704 à 1870, et dans la France septentrionale de 1608 à 1870.* Bordeaux, Paris, **1876** et **1881.**

REBOTTIER (R.) *Le climat pluviométrique des Basses Cévennes.* Monographie n° 7 de la Météorologie Nationale, **1957.**

RECEVEUR (M.) « Essai d'estimation de l'effet du réservoir de Serre de la Fare sur une crue observée à Grangent ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 8, **1965.**

RECQ cf. BALTENBERGER et RECQ, **1965.**

REMENIERAS (G.) et BOYER (J.) « Monographie hydrologique du bassin de la Maronne ». *La Houille Blanche,* n° 2, 4, 6, **1950.**

REMENIERAS (G.) — « Quelques exemples de stations de jaugeage à déversoir pour petits cours d'eau ». *Pluie, Evaporation, Filtration, Ecoulement.* La Houille Blanche, **1955.**

— *Eléments d'hydrologie appliquée.* Paris, Armand Colin, **1959.**

— *L'hydrologie de l'ingénieur.* Paris, Eyrolles, **1960.**

RENAUD (A.) — *Etude d'un aménagement intégré du bassin de la Loire et de ses affluents.* Tome I : Etude de l'amélioration des étiages, **1960 ;** tome II : Utilisation des eaux régularisées, **1960 ;** tome III : Etude économique et financière, **1961 ;** tome IV : L'axe navigable ligérien. A.N.E.C. L.A., Orléans, **1962.**

— « Les options fondamentales et leurs incidences économiques et sociales ». A.N.E.C.L.A., Orléans, **1962.**

RICHARDS (M. M.) cf. KOHLER (M. A.) et RICHARDS (M. M.), **1962.**

RIEUF (J.) *Monographie hydrologique du bassin de l'Alagnon,* 31 pages dactylographiées. Paris, **1951,** BB. S.H.F.

RIVOIRE (J.) et ROUSSET (C.) « Etude hydrogéologique des petits causses d'Allenc et de Montbel ». *Cahiers Géologiques,* n° 84, **1968,** pages 1019-1041.

ROBELIN (M.) — « Evapotranspiration réelle de différents couverts végétaux bien alimentés en eau, et évapotranspiration potentielle ». *Annales Agronomiques,* n° 13, **1962,** pages 493-522.

— cf. BOUCHET (R.J.) et ROBELIN (M.), **1969.**

ROBERT (M. E.) « Quelques réflexions et suggestions d'ordre pratique relatives à la prévision des crues (méthode de Bachet) ». *Xèmes Journées d'Hydraulique,* Paris, S.H.F., **1968.**

ROCHE (M.) — cf. RODIER (J.) et ROCHE (M.), **1955.**

— « Méthode d'estimation des débits d'étiage de faible fréquence ». *Commission des eaux de surface (Helsinki) A.I.H.S.*, **1960,** page 201.

— *Hydrologie de surface.* Paris, Gauthier-Villars, **1963.**

— « Les équations générales de l'écoulement ». *Mélanges Pardé,* Gap, Ophrys, **1968,** pages 585-595.

ROCHEFORT (M.) et TRICART (J.) « Rôle de l'écoulement subsuperficiel dans l'alimentation de certains cours d'eau ». *Comptes rendus Acad. Sc.*, **1959,** pages 267-270.

ROCHEFORT (M.) *Les fleuves.* Paris, P.U.F., Que sais-je, **1963.**

RODIER (J.) et ROCHE (M.) « Déficit d'écoulement annuel en pays tropicaux ». *La Houille Blanche,* Grenoble, **1955.**

RODIER (J.) « Irrégularité temporelle des cours d'eau et les facteurs qui la conditionnent ». *Publication de l'A.I.H.S.*, n° 63, **1964.**

RODIER (J.) et AUVRAY (C.) *Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km².* Paris, O.R.S.T.O.M., **1965.**

RODIER (J.) et FRANCOU (J.) *Essai de classification des crues maximales observées dans le monde.* Paris, EDF - O.R.S.T.O.M., **1967.**

RODIER (J.) « Caractères généraux des régimes hydrologiques des grands fleuves d'Afrique tropicale dans l'hémisphère nord ». *Bulletin de la section de Géographie, Comité des Travaux Historiques et Scientifiques,* tome LXXX, Paris, BB. Nationale, **1969,** pages 515-542.

ROMEJON (M.) « Application du modèle climatologie/débits au bassin de l'Allier ». *Centre d'Etudes Hydrométéorologiques Hyd./* n° 4, Montpellier, **1970.**

ROSELLE (B. du) « Les monts du Forez ». *Annales de Géographie*, **1950**, pages 241-258.

ROSETTI (M.) « Corrélations interpériodiques entre précipitations et débits ». *Publication de l'A.I.H.S.*, n° 38, **1954,** pages 472-477.

ROUCHON (V.) *Recherches sur les inondations de la Loire supérieure et de ses affluents dans le département de la Haute-Loire.* Paris, Champion, **1910.**

ROUGE (J.) « Hydrologie de l'Hérault ». *Bulletin Soc. Lang. de Géog.*, n° 1, **1959.**

ROUSSET (C.) cf. RIVOIRE (J.) et ROUSSET (C.), **1968.**

SABADEL (H.) cf. ORIEUX (A.) BARBIA (A.), POUGET (E.) et SABADEL (H.), **1967.**

SAINJON — *Etudes sur le régime de la Loire.* Ponts et Chaussées, **1858** (BB. d'Orléans, fonds GUILLON, Ms. 1879, fol. 52-143).

— *De l'annonce des crues dans le bassin de la Loire.* Orléans, **1864.**

SANSON (J.) — *Recueil de données statistiques relatives à la climatologie de la France.* Mémorial n° 30 de la Météorologie Nationale, Paris, **1945.**

— « La sécheresse de l'année 1945 en France ». *La Météorologie,* **1946 a,** pages 198-209.

— « Les anomalies des saisons ». *La Météorologie,* **1946 b,** pages 404-412.

— « La sécheresse remarquable de la période 1941-1949 en France ». *La Météorologie,* **1950 a,** pages 1-18.

— « La sécheresse remarquable de l'année agricole 1948-1949 en France ». *Annales de Géographie,* **1950 b,** pages 234-236.

SANSON (J.) et PARDE (M.) « La sécheresse des années 1942-1949 en France. *Rev. Géog. Alp.,* **1951,** pages 369-404.

SANSON-CARETTE (A.) — *Analyse statistique des séries d'observations pluviométriques.* Thèse Institut de Statistiques de l'Université de Paris, **1952.**

— « Analyse statistique des séries d'observations pluviométriques ». *La Météorologie,* **1953,** pages 16-37.

SAUCEROTTE (H.) — « Etude hydrologique de la nappe alluviale de l'Allier sur modèle mathématique ». *Centre d'Etudes Hydrométéorologiques, Hyd/* n° 23, Faculté des Sciences de Montpellier, **1968.**

— « Etude de la propagation des crues de l'Allier ». *Centre d'Etudes Hydrométéorologiques, Hyd/* n° 29, Faculté des Sciences de Montpellier, **1969.**

SCHOELLER (H.) *Les eaux souterraines.* Paris, Masson, **1962.**

SHWIRTZ (M.) cf. FUNEL (P.) et SCHWIRTZ (M.), **1969.**

SELTZER (P.) « Les précipitations atmosphériques dans le département du Puy-de-Dôme ». *Bulletin de l'Inst. et Obs. de Phys. du Globe du Puy-de-Dôme,* n° 10, **1948.**

SERRA (L.) — « Essai d'étude de l'influence de la nature géologique d'un bassin sur l'écoulement ». *Annuaire hydrologique S.H.F.,* **1947.**

— « Caractéristiques et causes météorologiques des sécheresses ». *Comptes rendus du congrès d'Helsinki, Publication de l'A.I.H.S.,* **1960,** pages 48-59.

— « Répartition temporelle et spatiale des périodes sèches, normales ou humides ». *Mélanges Pardé,* Gap, Ophrys, **1968.**

— « L'hydrologie des eaux de surface ». *Géophysique, encyclopédie de la Pleiade.* Paris, Gallimard, **1971,** pages 896-958.

STARON (G.) *Les crues de la Loire en amont de Bas-en-Basset.* Mémoire de maîtrise de Géographie, St-Etienne, **1970.**

STEYAERT (H.) cf. DINGEN (P.) et STEYAERT (H.), **1971.**

STRIFFLING (M.) cf. CONTAT (H.), LENOIR (G.) et STRIFFLING (M.), **1965.**

TASSEEL (M.) et VIAUT (A.) « Etude de la situation météorologique du 15 au 30 octobre 1940 ». *La Météorologie,* juillet-décembre **1944,** pages 154-167.

THUILLIER (J. L.) *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la Loire moyenne entre Gien et Cosne s/Loire.* Thèse d'ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers. Paris, **1969.**

THUILLIER (G.) — « Pour une histoire régionale de l'eau en Nivernais au XIXème siècle ». *Annales Economie Société Civilisation,* n° 1, **1968.**

— *Aspects de l'économie nivernaise au XIXème siècle.* Paris, Armand

Colin, **1971.**

TISON (L. J.) « Pluie, Evaporation, Ecoulement en Belgique ». *Pluie, Evaporation, Filtration, Ecoulement,* La Houille Blanche, Grenoble, **1955.**

TISON (G.) « Courbe de tarissement, coefficient d'écoulement et perméabilité du bassin ». *Comptes rendus du congrès d'Helsinki, Publication de l'A.I.H.S.,* **1960.**

THORNTHWAITE (C. W.) « An Approach Towards a Rational Classification of Climate ». *Trans. American Geophys. Union,* vol. 27, **1946,** n° 1, pages 55-94 et *Geographical Review,* n° 38, **1948.**

TOMAS (F.) *Le relief et les sols de la plaine du Forez.* Centre d'Etudes Foréziennes, Saint-Etienne, **1971.**

TONINI (D.) « L'Ansiei à Auronzo ». *Giornale Del Genio Civile,* septembre **1948.**

TRAUTMANN (J.) cf. MAITRE (C.) et TRAUTMANN (J.), **1968.**

TRICART (J.) cf. ROCHEFORT (M.) et TRICART (J.), **1959.**

TRICART (J.) et HIRSCH (F.) « Relations entre le débit et la superficie des bassins fluviaux ». *Annales de Géographie,* **1960,** pages 449-461.

TURC (L.) — *Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement.* Thèse de Doctorat ès-Sciences, Paris, **1953,** publiée dans les *Annales de l'I.N.R.A. série A - Annales Agronomiques,* **1954,** pages 491-595, et **1955,** pages 5-131.

— « Evaluation des besoins en eau d'irrigation ; évapotranspiration potentielle : formule climatique simplifiée et mise à jour ». *Annales Agronomiques,* **1961,** pages 13-49.

TURC (L.), GOBILLOT (T.), HLAVEK (R.) et LECARPENTIER (M.) « Cartes d'évapotranspiration potentielle. Interprétation et utilisation ». *Bulletin Technique du Génie Rural,* n° 60, Paris, janvier **1963.**

TURC (L.) — « Ressources en eau, évaluation de l'écoulement annuel des cours d'eau ». *Conférence des Nations Unies,* Genève, **1963.**

— « A propos d'indices climatiques ». *Mélanges Pardé,* Gap, Ophrys, **1968,** page 683.

VALI-KHODJEINI (A.) *Contribution à l'étude des crues régionales. Application au bassin versant de l'Allier.* Thèse pour le Doctorat de spécialité en Hydrologie. Faculté des Sciences de Paris, février **1969.**

VANNEY (J. R.) *L'hydrologie du Bas Guadalquivir.* Consejo superior de investigaciones cientificas. Madrid, **1970.**

VEREERSTRAETEN (J.) — « Contribution à l'étude hydrologique du bassin de la Meuse en Belgique ». *Bull. Soc. Belg. Et. Géog.,* n° 2, **1952,** pages 269-318.

— « La Meuse à Visé » (1954-1963). *Mélanges Pardé,* Gap, Ophrys, **1968,** pages 709, 716.

VERON (R.) — « Essais effectués à partir d'une méthode élaborée par M. Lacroix sur cinq crues observées en 1958 et 1960 sur l'Allier à Lavalette ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 7, **1964.**

— « L'Allier à Lavalette, Calculs de l'hydrogramme de la crue des 5 et 6 octobre 1963 ». *EDF, C.R.E.C. Hyd/* n° 18, **1964.**
— « Exposé des travaux concernant les calculs des hydrogrammes de crues à partir des relevés des précipitations ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 46, **1964.**
— « Calcul des crues du haut Allier ». *EDF, C.R.E.C., Hyd/* n° 33, **1965.**

VIAUT (A.) — cf. MIRONOVITCH (J.) et VIAUT (A.), **1935.**
— cf. BAULIEU (R.), MIRONOVITCH (J.) et VIAUT (A.), **1935.**
— cf. TASSEEL (M.) et VIAUT (A.), **1944.**
— « Les aspects du temps en Europe occidentale ». *La Météorologie,* Paris, **1947.**

VIVIAN (H.) « Les affluents rive gauche de la Loire de Gien à Nantes ; essai d'évaluation de débit trentenaire par les méthodes géographiques d'extension à la normale ». *Etudes Ligériennes,* n° 7, **1970,** pages 29-66.

VUITTENEZ (H.) *Géologie cantalienne.* Aurillac, Imprimerie Moderne, **1964.**

Anonymes

— *Annuaires, atlas et publications de la Météorologie Nationale,* 1, quai Branly, Paris (7è).

— *Annuaires hydrologiques de la France.* Société Hydrotechnique de France (S.H.F.), 199, rue de Grenelle, Paris (7è).

— *Stations de jaugeage exploitées par les Circonscriptions Electriques.* Annuaires de 1961 à 1969. Ministère de l'Industrie, Direction du Gaz et de l'Electricité, Paris, Imprimerie Nationale. A partir de 1969, mêmes publications annuelles sous le titre : *Annuaire National des débits des cours d'eau.* Imprimerie Nationale.

— *Stations hydrométriques françaises. Région du Massif Central,* S.H.F., 1951.

— *Atlas hydroélectrique,* Chambre Syndicale des Forces Hydrauliques. Paris, 1945 - mise à jour en 1948.

— *Centrales hydrauliques, réservoirs et centrales thermiques en France.* Direction du Gaz et de l'Electricité, 1955.

— *Centrales hydrauliques françaises d'une puissance installée supérieure ou égale à 1.000 kva* - Caractéristiques au 1er janvier 1965. **E.D.F.**

— *Etudes et rapports E.D.F. :*
- Division Technique Générale (D.T.G.), Grenoble
- Centre d'Etudes Hydrométéorologiques « Massif Central », Brive
- Groupes Régionaux de Production Hydraulique (G.R.P.H.) de St. Etienne et de Brive
- Région d'Equipement Hydraulique (R.E.H.) « Massif Central » de Clermont-Ferrand.

— *Cartes et Documents de l'Agence Financière de Bassin « Loire-Bretagne »*, av. de Buffon, 45018 Orléans Cedex.

— *Etude du régime hydrologique de l'Allier jusqu'à Alleyras et de Vic-le-Comte au Bec d'Allier.* S.O.G.R.E.A.H. (1958-1961). Ministère de l'Agriculture, Service Technique Central de l'Hydraulique.

— *Le Bassin de la Loire, Etude préliminaire des besoins en eaux biologiques.* Ministère de l'Agriculture, Direction Générale du Génie Rural et de l'Hydraulique Agricole, 2 volumes, mars 1965.

— *L'eau dans le bassin Loire-Bretagne. Projet de livre blanc.* Schéma général d'aménagement de la France. Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale (D.A.T.A.R.), 1972, 1, rue Charles Floquet, Paris (7ème).

— *Etude hydrologique du bassin de la Bourbince : Régime des basses eaux, Crues du 1er octobre 1965.* Mission Technique de l'Eau Loire-Bretagne, D.A.T.A.R., décembre 1967.

— *Bulletin mensuel de l'A.N.E.C.L.A.*, 45044 Orléans Cedex.

— *Rapports généraux pour les Vème et VIème Plans.* Commission de l'Eau. Documentation Française, 1966 et 1971.

— *Le problème de l'eau en France.* Notes et Etudes Documentaires, n° 3219, 1965. La Documentation Française, Paris.

— *Le Moniteur des Travaux Publics* (n° spécial sur l'Eau), janvier 1968.

— *Méthodes d'étude régionale des ressources en eau. Applications au bassin de l'Allier.* S.M.E.R.S., Université des Sciences et Techniques de Montpellier, 1973.

Documents manuscrits

• *Fonds Paul GUILLON.* Bibliothèque Municipale d'Orléans (Manuscrits n° 1878 - 1906). Livres manuscrits et plans relatifs à la Loire ou à l'hydraulique fluviale provenant d'un don de P. GUILLON, ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées - Service special de la Loire.

• *Archives des Ponts et Chaussées.* Bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

• *Fonds des Ponts et Chaussées d'Orléans versé aux Archives du Loiret en 1969* (Ms. 30845 à 30977).

• *Fonds de la Bibliothèque de la Société Hydrotechnique de France.*

TABLE DES FIGURES

PREMIERE PARTIE

Tome II

Figures page

Chapitre I. *Inventaire des données pluviométriques et hydrométriques*

1. - Courbes des pluies cumulées à Viverols, St. Anthême, Passouira 1
2. - Courbes hypsométriques des bassins et fréquences des pluviomètres par tranches d'altitude à l'amont de Gien, Pont-du-Guétin, Bas-en-Basset et Vieille-Brioude 4
3. - Réseau hydrométrique d'annonce des crues dans le bassin de la Loire en amont de Gien 17
4. - Influence des variations de la réserve de Grangent sur les débits journaliers de la Loire à Villerest au cours de 1961 28
5. - Répartition, suivant leur taille, des bassins explorés 29
6. - Carte des stations de jaugeage en service 30

Chapitre II. *La brièveté des séries d'observation et le problème de leur valeur représentative*

7^1. - Fréquences relatives cumulées des pluies et des débits annuels, et droites ajustées à la loi de distribution de Gauss sur le bassin de l'Ance du Nord à Laprat 31
7^2. - Fréquences relatives cumulées des pluies et des débits annuels, et droites ajustées à la loi de distribution de Gauss sur le bassin de la Borne à Chadrac 32
7^3. - Fréquences relatives cumulées des pluies et des débits annuels, et droites ajustées à la loi de distribution de Gauss sur le bassin du Lignon du Velay à Pont-de-Lignon 33
8. - Fréquences relatives cumulées des pluies et des débits annuels, et droites ajustées à la loi de distribution de Galton-Gibrat sur les bassins de l'Ance du Nord, de la Borne et du Lignon du Velay 34
9. - Valeurs moyennes des modules de dix années consécutives en dix stations du bassin de la Loire 37

page

10. - Coefficients mensuels de débit des meilleures décennies récentes, comparés à ceux de la période de référence 1920-1968,
à Villerest, Bas-en-Basset, 39
à Giroux, Pont-du-Bouchet, Vieille-Brioude, 40
à Chadrac et Laprat 41

Chapitre III. *Quelques jalons dans l'ensemble ligérien : les bassins élémentaires*

11. - Résultats comparés des hauteurs de pluie moyenne annuelle obtenues par la pondération Thiessen et la moyenne arithmétique sur les bassins du Lignon, de la Borne et de l'Ance du Nord 45
12. - Résultats comparés des hauteurs de pluie moyenne au cours d'épisodes pluvieux obtenues par la pondération Thiessen et la moyenne arithmétique sur les bassins de l'Allier, du Chapeauroux et de la Seuge 46
13. - Extrait de la carte schématique des pentes en France de J.P. DEFFONTAINES 52

DEUXIEME PARTIE

14. - Profils en long de la Loire jusqu'à Gien, de l'Allier, de la Dore et de la Sioule 53
15. - Evolution, en 1965, des débits moyens journaliers à Bas-en-Basset et Vieille-Brioude, 54
Digoin et Billy, 54
Nevers et Pont-du-Guétin 55

Chapitre I. *Une difficulté de la définition des régimes : la variabilité interannuelle des débits mensuels*

16. - Histogrammes des débits mensuels particuliers de la Borne à Chadrac 61
17. - Valeurs mensuelles du coefficient K 3 en quinze stations du bassin de la Loire 67
18. - Carte des principales lignes de relief et trajectoires les plus fréquentes de courants perturbés 69

Chapitre II. *Les variations saisonnières dans le bassin de la Loire et le régime du fleuve de sa source à Gien*

19. - Carte de la pondération des régimes hydrologiques dans le bassin de la Loire hors-texte
20. - Courbes moyennes globales des pluies et des débits à Bas-en-Basset, Chadrac et Laprat (1919-1968) 76

page

21. - Courbes des débits moyens mensuels particuliers sur la Borne à Chadrac, et des pluies mensuelles à Sanssac au cours de la décennie 1956-1965 77
22. - Carte hypsométrique à la limite sud-orientale du bassin de la Loire 80

Chapitre III. *Basses eaux et étiages*

23. - Courbes des débits journaliers classés à Blois, Gien, Villerest, Vieille-Brioude 82
24. - Courbes des débits journaliers classés (débits inférieurs au DC 300 jours) à Blois, Gien, Pont-du-Bouchet, Giroux (Dore), Villerest et Vieille-Brioude 83
25. - Courbes des débits journaliers classés (débits inférieurs au DC 300 jours) à Saint-Floret, Pont-du-Vernet, Bas-en-Basset, Paulhaguet, Vieille-Brioude 84
26. - Evolution des débits mensuels moyens et médians en quelques stations du bassin de la Loire 87
27. - Fréquences mensuelles des débits inférieurs au DC 11 moyen global à Villerest, Vieille-Brioude, Pont-du-Bouchet, Giroux 91
28. - Evolution du débit journalier pendant l'étiage de 1962 à Blois, Gien, Nevers et Pont-du-Guétin 94
29. - Etiages de 1949 et de 1947 96
30. - Etiage de 1961 97
31. - Etiage de 1962 98
32. - Etiage de 1964 99
33. - Décroissances du débit moyen journalier de l'Allier à Lavalette en saison froide et en saison chaude de 1958 à 1965 101
34. - Décroissances du débit moyen journalier de l'Allier à Lavalette en saison chaude de 1958 à 1965 102
35. - Décroissances du débit moyen journalier du Chapeauroux à Chapeauroux en saison froide et en saison chaude de 1960 à 1965 103
36. - Courbes de décroissances moyennes par périodes successives de cinq jours sur la Couze de Pavin, l'Allier, l'Allanche, la Sénouire, la Sioule et le Chapeauroux 105

Chapitre IV. *Averses et crues*

37. - Parts respectives de la Loire et de l'Allier dans les débits de crues au Bec d'Allier de 1955 à 1967 107
38. - Maxima et minima relevés chaque année à l'échelle de Gien de 1825 à 1970 108
39. - Histogramme des débits moyens journaliers maxima des crues supérieures à 500 m^3/s à Gien de 1939 à 1970 109

page

40. - Histogrammes des volumes bruts et nets des crues ayant dépassé à Gien 500 m³/s de 1939 à 1970 — 110
41. - Histogrammes de fréquences des plus grandes crues de la Loire comparés au régime moyen global à Montjean et à Gien — 115
42. - Histogrammes de fréquences des crues de la Loire à Gien de 1939 à 1970 et de 1825 à 1970 — 116
43. - Histogrammes de fréquences des crues de la Loire à Bas-en-Basset et de l'Allier à Vieille-Brioude, de 1918 à 1970 — 117
44. - Histogrammes de fréquences des crues de la Dore à Giroux et de la Sioule à Pont-du-Bouchet, de 1918 à 1970 — 118
45. - Corrélation entre les coefficients d'écoulement de crues et les hauteurs des précipitations sur les bassins de l'Allier à Lavalette, du Chapeauroux à Chapeauroux et de la Seuge à Saugues — 122
46. - Corrélation entre déficits d'écoulement des crues « pluviales » et hauteurs des précipitations sur les bassins de l'Allier à Lavalette, du Chapeauroux à Chapeauroux et de la Seuge à Saugues — 123
47. - La nappe alluviale de la Loire
    A - Localisation des principaux points d'observation — 126
    B - Ecoulement des eaux de la nappe en régimes différents — 127
    C - Influence de la crue du 16 janvier 1947 sur le profil de la nappe alluviale de la Loire — 127
48. - Episode pluvieux et hydrogrammes de la crue de novembre 1968 sur les hauts bassins de l'Allier et de la Loire — 128
49. - Hydogrammes, carte d'isohyètes et situation météorologique du 31 octobre au 2 novembre 1968 sur le haut Allier — 135
50. - Crue de septembre 1932 — 140
51. - Crues de septembre - octobre 1933 — 138
52. - Crue du début du mois de mars 1930 — 141
53. - Averse cévenole de décembre 1957 — 142
54. - Averse cévenole des 31 octobre - 1er novembre 1963 — 143
55. - Situation météorologique du 30 septembre 1958 — 144
56. - Situation météorologique du 4 octobre 1958 — 145
57. - Situation météorologique des 2, 3, 4 octobre 1960 — 146
58. - Isohyètes de l'averse des 5 et 6 octobre 1960 sur les hauts bassins de la Loire et de l'Allier — 147
59. - Averse et crue de septembre - octobre 1965 sur l'Arroux — 149
60. - Situation météorologique du 30 septembre 1965 — 150
61. - Episode pluvieux et crue du mois de mai 1965 — 152
62. - Evolution de la situation météorologique du 22 au 25 mai 1959 — 154

page

63. - Evolution de la situation météorologique du 22 au 25 mai 1958 156

64. - Courbes d'évolution des débits moyens journaliers à Gien, Nevers, Pont-du-Guétin, Le Verdier, Bas-en-Basset et Vieille-Brioude pour trois crues de saison froide 158

65. - Situation météorologique du 14 février 1957 160

66. - Evolution de la situation météorologique du 22 au 26 décembre 1968 162

67. - Chronologie des épisodes pluvieux et extension approximative des pluies en mai - juin 1856 164

TROISIEME PARTIE

Chapitre I. *De l'opportunité d'une année hydrologique dans le bassin de la Loire*

68. - Délimitation de l'année hydrologique dans le bassin de la Piave 167

69. - Variation des coefficients de corrélation entre pluies et débits annuels selon le mois initial choisi, en vingt-trois bassins de la Loire supérieure 170

70. - Histogrammes de fréquences relatives des bonnes et des mauvaises années hydrologiques selon le mois initial choisi, en vingt-trois stations du bassin supérieur de la Loire 172

71. - Le début de la meilleure année hydrologique dans vingt-trois bassins élémentaires de la haute Loire et du haut Allier 175

72. - Histogrammes des pluies annuelles particulières sur le bassin de l'Ance du Nord pour les douze années possibles 176

Chapitre II. *Précipitations et débits annuels : les bilans d'écoulement dans les bassins témoins*

73. - Graphique de corrélation entre pluies et débits annuels sur le bassin de la Borne à Chadrac 180

74. - Graphique de corrélation entre pluies et débits annuels sur le bassin de la Gazeille au Monastier 180

75. - Graphique de corrélation entre pluies et débits annuels sur le bassin du Vernazon au Crouzet 180

76. - Graphique de corrélation entre pluviosités et hydraulicités sur le bassin de la Loire à Bas-en-Basset 181

77. - Graphique de corrélation entre pluviosités et hydraulicités sur le bassin du Lignon du Velay à Pont-de-Lignon 182

78. - Graphique de corrélation entre pluviosités et hydraulicités sur le bassin de l'Ance du Nord à Laprat 183

page

79. - Graphique de corrélation entre pluviosités et hydraulicités sur le bassin de la Couze de Pavin à St Floret 184

80. - Graphique de corrélation entre hydraulicités et pluviosités sur trente bassins de la Loire supérieure 185

81. - Graphique de corrélation entre pluies et débits annuels pour trente bassins de la Loire supérieure 186

82. - Corrélations pluvio-fluviales en diverses régions dont le bassin supérieur de la Loire 190

83. - Diagrammes de dispersion des déficits particuliers en fonction des précipitations sur quelques bassins ligériens 194

- Loire à Rieutord, Vernazon au Crouzet, Gazeille au Monastier 194
- Chapeauroux à Chapeauroux, Langouyrou à Langogne, Lignon du Velay à Chambon s/Lignon, Seuge à Saugues 195
- Lignon du Forez à Rory, Ance du Nord à Laprat, Lignon du Velay à Pont-de-Lignon 196
- Loire à Bas-en-Basset, Borne à Chadrac, Besbre à Mayet-de-Montagne 197

84. - Graphiques de corrélation entre pluies annuelles ou saisonnières, déficits d'écoulement et quotients d'écoulement sur le bassin du Lignon du Velay à Pont-de-Lignon 202

85. - Corrélations entre déficits, quotients d'écoulement et écoulement, d'une part, et entre évapotranspiration potentielle et bilan hydrique théorique, d'autre part, sur le bassin de la Loire à Bas-en-Basset 206

86. - Corrélations entre déficits, quotients d'écoulement et écoulement, d'une part, et entre évapotranspiration potentielle et bilan hydrique théorique, d'autre part, sur le bassin de la Borne à Chadrac 208

87. - Corrélation entre déficits annuels globaux et pluies moyennes annuelles pour trente bassins ligériens 213

88. - Corrélation entre pluie moyenne annuelle et altitude moyenne du bassin versant pour trente bassins ligériens 213

89. - Graphique de corrélation entre précipitations annuelles globales et quotients d'écoulement en trente bassins ligériens 215

90. - Graphique de corrélation entre déficits globaux d'écoulement et température moyenne en trente bassins ligériens & droite de régression 215

91. - Application de l'abaque de WUNDT aux bilans de trente bassins ligériens 217

92. - Comparaison des déficits mesurés et de leur valeur calculée par la formule de L. TURC 221

93. - Comparaison des écoulements mesurés et de leur valeur calculée par la formule de L. TURC 221

page

94. - Etablissement de L en fonction de la température moyenne annuelle, en trente bassins ligériens 222

95. - Comparaison entre L selon LUCIEN TURC et L calculé par M. DACHARRY pour trente bassins ligériens 223

Chapitre III. *Les ressources hydriques naturelles en amont de Gien*

96. - Drainages superficiel et souterrain dans le haut bassin du Chapeauroux 224

97. - Pertes ou gains relatifs des volumes bruts de crues entre le Bec d'Allier et Gien 226

98. - Traits dominants de la morphologie du bassin de la Loire entre le Bec d'Allier et Gien 227

99. - Isopièzes de la nappe albienne (1964) 228

100. - Déplacement de la nappe dans les alluvions en fonction du niveau de la Loire 229

101. - Localisation des stations de jaugeage de Nevers, Le Guétin et Givry-Fourchambault dans le Val 230

102. - Carte des écoulements moyens annuels dans le bassin de la Loire supérieure 236

103. - Modules de la Loire à Gien de 1918 à 1971 239

104. - Pluviosité sur le bassin de la Loire en amont de Gien (moyenne 1951-1970) 240

105. - Evolution mensuelle des précipitations, de l'écoulement et du déficit d'écoulement sur le bassin de la Loire en amont de Gien (moyenne 1921-1950) 242

FICHES ET CARTES DES BASSINS TEMOINS

Rivière	*Station de jaugeage*	
Bassin de l'Alagnon	à JOURSAC-LE-VIALARD	244
Bassin de l'Allier	LAVALETTE	246
Bassin de l'Allier	ALLEYRAS-POUTES	248
Bassin de l'Allier	VIEILLE-BRIOUDE	250
Bassin de l'Ance du Nord	LAPRAT	252
Bassin de la Besbre	MAYET-DE-MONTAGNE	254
Bassin de la Borne	CHADRAC	256
Bassin du Chapeauroux	CHAPEAUROUX	258
Bassin de la Couze de Chambon	CHAMPEIX	260
Bassin de la Couze de Pavin	SAINT-FLORET	262
Bassin de la Dore	GIROUX	264

		page
Bassin de la Gazeille	LE MONASTIER	266
Bassin du Langouyrou	LANGOGNE	268
Bassin du Lignon du Forez	RORY	270
Bassin du Lignon du Velay	PONT-DE-LIGNON	272
Bassin de la Loire	RIEUTORD	274
Bassin de la Loire	BAS-EN-BASSET	276
Bassin de la Sénouire	PAULHAGUET	278
Bassin de la Seuge	SAUGUES	280
Bassin de la Sioule	PONT-DU-BOUCHET	282
Bassin du Vernazon	LE CROUZET	284

TABLE DES TABLEAUX

Les tableaux qui se trouvent dans le tome I sont marqués d'un astérisque

PREMIERE PARTIE

Tableaux page

Chapitre I. *Inventaire des données pluviométriques et hydrométriques*

N° 1 - Répartition, par tranches d'altitude, des pluviomètres sur les bassins versants de la Loire à Gien, à Bas-en-Basset, et de l'Allier à Vieille-Brioude, à Pont-du-Guétin 3

N° 2 - Liste des postes pluviométriques du bassin de la Loire en amont de Gien et moyennes globales de pluie annuelle 6

N° 3 - Nomenclature des stations hydrométriques du Service d'Annonce des Crues dans le bassin de la Loire en amont de Gien 18

N° 4 - Stations de jaugeage en service sur la Loire et ses affluents en amont de Gien 23

N° 5 - Influence des réserves d'ouvrages hydroélectriques sur les débits 27

N° 6* - Rôle des prélèvements de Montpezat A sur le module de la Loire à Chadrac, Bas-en-Basset et Gien 45*

Chapitre II. *La brièveté des séries d'observation et le problème de leur valeur représentative*

N° 7 - Test de la normalité de la distribution des pluies et des débits annuels pour l'Ance du Nord, la Borne et le Lignon 35

N° 8 - Caractères statistiques des pluies et des débits annuels sur les bassins de l'Ance du Nord, de la Borne, du Lignon du Velay et des pluies à Viverols, Le Puy, Clermont-Ferrand 36

N° 9 - Les meilleures décennies hydrologiques pour quelques stations du bassin de la Loire en amont de Gien 38

N° 10 - Moyennes mobiles de dix ans des débits mensuels et annuels de l'Ance du Nord à Laprat (1920-1967) 42

N° 11 - Débit moyen journalier le plus faible de chaque année à Villerest et Gien de 1949 à 1970 44

page

Chapitre III. *Quelques jalons dans l'ensemble ligérien : les bassins élémentaires*

N° 12 - Pourcentage moyen d'écart des moyennes arithmétique et de Thiessen à la valeur obtenue par planimétrage des cartes d'isohyètes lors d'averses particulières 47

N° 13 - Pluie moyenne sur le bassin de la Sioule évaluée par différentes méthodes 48

N° 14 - Pluie moyenne sur le bassin de l'Allier à Vieille-Brioude 48

N° 15* - Répartition des précipitations dans l'année (1936-1965) sur le bassin du Lignon du Velay 75*

N° 16 - Caractères morphologiques des bassins témoins 49

N° 17 - Caractères pluviométriques des bassins témoins 50

N° 18 - Caractères granulométriques d'altérites sur divers substratum 51

DEUXIEME PARTIE

N° 19* - Rapports des moyennes mensuelles extrêmes de la Loire et de l'Allier 89*

Chapitre I. *Une difficulté de la définition des régimes : la variabilité interannuelle des débits mensuels*

N° 20 - Débits mensuels et coefficients mensuels de débit de la Loire à Gien pour quarante années (1921-1960) 56

N° 21A - Fréquences relatives en chaque mois du débit maximum annuel et coefficients mensuels de débit 57

B - Fréquences relatives en chaque mois du débit minimum annuel et coefficients mensuels de débit 58

N° 22 - Le régime de la Loire à Villerest au cours de cinq décennies successives 59

N° 23 - Comparaison avec la période « normale » des coefficients mensuels de débit calculés, pour des périodes globales de trente ans, sur quelques stations du bassin de la Loire 60

N° 24 - Valeurs des quantiles de distribution des débits mensuels aux stations fondamentales 62
- calculées sur des lois de Galton ajustées aux observations de la période 1920-1959
- observées pendant la période « normale » de cinquante ans

N° 25 - Rapport des moyennes mensuelles extrêmes particulières en dix-sept stations du bassin de la Loire 64

N° 26 - Valeurs mensuelles de l'indice K 3 en dix-sept stations du bassin de la Loire 65

page

N° 27 - Mois des variations interannuelles les plus fortes et les plus faibles en dix-sept stations du bassin de la Loire 66

Chapitre II. *Les variations saisonnières dans le bassin de la Loire et le régime du fleuve de sa source à Gien*

N° 28 - Coefficients mensuels de débit en quarante-huit stations du bassin de la Loire supérieure 70

N° 29 - Coefficient mensuel de débit le plus fort en chaque station 72

N° 30 - Coefficient mensuel de débit le plus faible en chaque station 73

N° 31* - Classement des coefficients mensuels de débit d'après R. KELLER 107*

N° 32 - Eléments descriptifs des régimes saisonniers pour quarante-huit stations hydrométriques 74

N° 33* - Bilan apparent à Rory (Lignon du Forez) pendant l'hiver 1950-1951 115*

N° 34 - Coefficient d'écoulement mensuel apparent sur les bassins témoins 78

N° 35 - Coefficient mensuel de débit et coefficient d'écoulement apparent sur la Loire en amont de Gien (1921-1950) 79

Chapitre III. *Basses eaux et étiages*

N° 36 - Débits spécifiques d'étiages extrêmes sur la Loire et quelques rivières françaises 81

N° 37 - Débits classés caractéristiques de la Loire et de ses affluents en diverses stations du bassin 85

N° 38 - Rapport du débit caractéristique d'étiage au minimum connu, en diverses stations du bassin de la Loire 86

N° 39 - Débits mensuels moyens et médians et rapport des débits médians aux débits moyens globaux 88

N° 40 - Débits spécifiques mensuels médians et rapport du débit médian au débit moyen, à Chadrac, Bas-en-Basset et Villerest 90

N° 41 - Nombre moyen de jours pendant lesquels les eaux se sont tenues au-dessous du DC 11 moyen global à Vieille-Brioude, Villerest, Giroux et Pont-du-Bouchet 90

N° 42 - Fréquence des plus faibles débits annuels à Vieille-Brioude, Villerest, Giroux et Pont-du-Bouchet 92

N° 43 - Principaux étiages à Blois de 1863 à 1972 93

N° 44* - Principaux étiages à Gien depuis 1939 145*

N° 45 - Valeurs minimales annuelles du débit moyen journalier pour les dix jours consécutifs les plus bas à Chadrac, Villerest, Vieille-Brioude, Saint-Floret, Giroux et Pont-du-Bouchet 95

page

N° 46* - Graves étiages à Saint-Floret depuis 1919 147*

N° 47 - Indices hydrologiques globaux de bassins versants 100
A - d'après C. MAITRE et J. TRAUTMANN
B - d'après M. MASSON

N° 48 - Taux moyens journaliers de décroissance des débits bruts par périodes successives de cinq jours consécutifs en saison froide et en saison chaude 104

N° 49* - Coefficient de tarissement α de l'Allanche, de la Sénouire, de la Couze Pavin, de la Sioule, de l'Allier à Lavalette et du Chapeauroux 156*

N° 50* - Valeurs des coefficients de tarissement α de saison chaude suivant le débit initial sur l'Allanche, la Couze de Pavin, l'Allier à Lavalette, la Sioule, la Sénouire et le Chapeauroux 158*

N° 51* - Valeurs de la réserve lors des écoulements égaux aux DC 6, DC 11 et DC E sur la Couze de Pavin, l'Allanche, l'Allier à Lavalette, la Sioule, la Sénouire et le Chapeauroux 158*

Chapitre IV. *Averses et crues*

N° 52 - Valeurs du coefficient A pour quelques crues records sur des bassins de superficies comparables 106

N° 53* - Parts respectives de la Loire et de l'Allier dans le débit moyen annuel au Bec d'Allier, de 1955 à 1969 166*

N° 54 - Volumes des crues de la Loire de 1939 à 1969 à Gien, Nevers et Pont-du-Guétin 111

N° 55 - Rendement d'averses pluviales et « nivales » sur le bassin de l'Allier à Lavalette de 1958 à 1965 119

N° 56 - Rendement d'averses pluviales et « nivales » sur le bassin de la Seuge à Saugues de 1958 à 1965 120

N° 57 - Rendement d'averses pluviales et « nivales » sur le bassin du Chapeauroux à Chapeauroux de 1960 à 1965 121

N° 58 - Rendement des plus fortes averses relevées sur le bassin de la Seuge de 1958 à 1965 124

N° 59 - Dix crues de différentes tailles et leur cause pluviale sur le bassin de la Sioule à Pont-du-Bouchet 124

N° 60* - Averse et crue du 2 novembre 1968 sur le haut Allier 180*

N° 61 - Rendement de quelques averses sur le bassin de l'Allier 125
- en amont de Vieille-Brioude
- et de Vieille-Brioude à Billy St. Yorre

N° 62* - Bilans de la crue du 19 au 23 mai 1965 sur le bassin de la Loire 180*

N° 63* - Précipitations sur le bassin de l'Allier à l'aval de Vieille-Brioude lors des crues de septembre 1875 et octobre 1943 184*

page

N° 64 - Liste des crues ayant atteint ou dépassé 4 m 50 à Gien depuis 1825 130

N° 65 - Mesure de l'atténuation ou du gonflement relatifs de quelques crues de la Loire et de l'Allier 131

N° 66 - Classement de quelques crues de la Loire en amont de Gien suivant l'évolution de l'intumescence 132

N° 67 - Débits de la crue de décembre 1968 en plusieurs stations en amont de Gien 165

TROISIEME PARTIE

Chapitre I. *De l'opportunité d'une année hydrologique dans le bassin de la Loire*

N° 68 - Coefficients de corrélation entre pluies et débits établis par E. INDRI dans le cadre de l'année civile et dans celui de l'année hydrologique pour le bassin de la Piave 166

N° 69 - Coefficients de corrélation entre pluies particulières et débits contemporains au cours de douze années hydrologiques possibles, en vingt-trois stations du bassin de la Loire 168

N° 70 - Coefficients de corrélation entre pluies particulières et débits contemporains en vingt-trois stations du bassin de la Loire pour l'année civile, pour l'année hydrologique la meilleure et pour l'année hydrologique la plus mauvaise 173

N° 71* - Comparaison des indices de précipitations et d'écoulement en saison froide dans les bassins de la Besbre à Mayet-de-Montagne et de la Sénouire à Paulhaguet 230*

N° 72 - Variabilité de l'évaporation mensuelle au Puy (1949-1967) 174

N° 73 - Variabilité des pluies moyennes annuelles sur le bassin de l'Ance du Nord et à la station de Viverols, suivant les douze cycles annuels possibles 178

N° 74 - Variabilité des pluies moyennes annuelles sur le bassin de la Borne et à la station du Puy, suivant les douze cycles annuels possibles 179

Chapitre II. *Précipitations et débits annuels : les bilans d'écoulement dans les bassins témoins*

N° 75 - Corrélation entre hydraulicité et pluviosité sur quelques bassins de la Loire supérieure 187

N° 76 - Valeur du coefficient λ dans l'équation $Y = \lambda X$ pour divers bassins comparés à ceux de la Loire supérieure 189

N° 77 - Bilan moyen de l'écoulement pour quelques rivières belges d'après L.J. TISON 192

page

N° 78 - Coefficient de corrélation entre pluies et débits pour les vingt et un bassins témoins 193

N° 79 - Rapports entre valeurs extrêmes particulières des précipitations, des débits et des déficits pour quelques bassins de la Loire supérieure 198

N° 80 - Rapport des déficits extrêmes particuliers (A), rapport des quotients d'écoulement extrêmes particuliers (B) et traits caractéristiques de quinze bassins ligériens 199

N° 81* - Coefficient de variation des pluies, des débits et des déficits annuels particuliers sur les bassins de la Borne à Chadrac, de la Loire à Bas-en-Basset, du Lignon du Velay à Pont-de-Lignon et de l'Ance du Nord à Laprat 251*

N° 82 - Influence de la répartition des pluies au cours de l'année sur le déficit d'écoulement pour le bassin du Lignon à Pont-de-Lignon de 1928 à 1953 200

N° 83 - Evapotranspiration potentielle et bilans hydriques annuels théoriques aux stations de Clermont-Ferrand et du Puy (1949-1967) 203

N° 84 - Evapotranspiration potentielle et bilans hydriques mensuels théoriques à la station du Puy (1949-1967) 204

N° 85 - Bilans annuels globaux en trente stations du bassin de la Loire supérieure 210

N° 86 - Déficits et écoulements annuels globaux : valeurs mesurées comparées aux valeurs calculées par la formule de L. TURC, en trente bassins de la Loire supérieure 218

Chapitre III. *Les ressources hydriques naturelles en amont de Gien*

N° 87 - Bilans d'écoulement des années 1858, 1859 et 1860 sur 435 km² de part et d'autre de la Loire entre Briare et Sully 231

N° 88 - Débits moyens annuels aux stations de jaugeage du bassin de la Loire en amont de Gien 232

N° 89 - Pluviosités annuelles moyennes évaluées par planimétrage sur des surfaces partielles du bassin de la Loire supérieure pour la période 1931-1960 237

N° 90 - Comparaison des débits moyens mensuels mesurés à Digoin, et entre Digoin et Nevers, de 1958 à 1968 238

N° 91 - Bilans globaux de l'écoulement en amont de Gien 241